



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISA STABILITAS TRANSIEN PADA SISTEM TRANSMISI
SUMATERA UTARA 150 KV - 275 KV DENGAN
PENAMBAHAN PLTA BATANG TORU 4 X 125 MW**

Danar Tri Kumara
NRP 2214 105 081

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penagsang, Msc Ph D
Ir. Ni Ketut Aryani, MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS IN
TRANSMISSION SYSTEM OF NORTH SUMATERA
150 KV – 275 KV WITH THE ADDITION PLTA BATANG
TORU 4 X 125 MW**

Danar Tri Kumara
NRP 2214 105 081

Advisor
Prof. Ir. Ontoseno Penagsang, Msc Ph D
Ir. Ni Ketut Aryani, MT

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**ANALISA STABILITAS TRANSIEN PADA SISTEM
TRANSMISI SUMATERA UTARA 150 KV – 275 KV
DENGAN PENAMBAHAN
PLTA BATANG TORU 4 X 125 MW**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph.D
NIP. 19490715 197412 1 001

Ir. Ni Ketut Aryani, MT
NIP. 196509011991032002



Analisa Stabilitas Transien pada Sistem Transmisi Sumatera Utara 150 kV – 275 kV Dengan Penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW

Nama : Danar Tri Kumara

NRP : 2214105081

Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRAK

Sistem kelistrikan Sumatera Utara yang dipasang dengan menggunakan sistem Transmisi 150 kV dan 275 kV merupakan sistem transmisi dengan pusat beban terbesar di Sumatera. Dalam upaya memenuhi kebutuhan listrik, sesuai dengan RUPTL, Sistem Transmisi Sumatera Utara akan mengoperasikan PLTA Batang Toru dengan kapasitas 4 x 125 MW pada tahun 2020. Karena potensi sumber energi yang cukup besar di Sumatera Utara adalah tenaga air dan panas bumi. Dengan penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW, perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk mengetahui kestabilan sistem saat terjadi gangguan transien. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa *case* lepasnya generator, lepasnya satu saluran dan saluran ganda tidak menyebabkan sistem keluar dari batas stabil. Karena ketika generator lepas, daya *supply* yang hilang hanya 5-8% dari total pembangkitan. Begitu juga dengan kasus *single pole auto reclosing* dengan waktu *Circuit Breaker* kembali tertutup sebesar 500 ms setelah gangguan, hasil respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan menunjukkan sistem masih stabil. Pada penentuan waktu pemutusan kritis (CCT), nilai CCT pada sistem 2018 dapat ditemukan pada 120 ms – 140 ms (batas rekomendasi CCT sistem besar). Sedangkan pada sistem 2020 tetap dalam keadaan stabil ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa. Sehingga penentuan CCT (*Critical Clearing Time*) melebihi dari batas rekomendasi nilai CCT untuk sistem besar.

Kata Kunci : kestabilan transien, generator lepas, saluran lepas, *single pole auto reclosing*, *critical clearing time*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Transient Stability Analysis in Transmission System of North Sumatera 150 kV – 275 kV with the Addition PLTA Batang Toru 4 x 125 MW

Name : Danar Tri Kumara
NRP : 2214105081
Counsellor Lecturer 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Counsellor Lecturer 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRACT

North Sumatra electrical systems are supplied using 150 kV - 275 kV transmission system with the largest load in Sumatra. To meet the demand for electricity, according to the RUPTL, North Sumatra Transmission System will operate the power plant Batang Toru with a capacity of 4 x 125 MW by the year 2020. Because of the potential source of considerable energy in North Sumatra are hydropower and geothermal. With the addition of hydropower Batang Toru 4 x 125 MW, transient stability studies need to be conducted to determine the stability of the system during a transient interruption. From the simulation results show that the loss of the generator case, the loss of a single channel and dual channel does not cause the system out of the stable boundary. Because when the generator is off, the power supply is lost only 5-8% of the total generation. So the case with a single pole auto reclosing Circuit Breaker closed again time 500 ms after the disturbance, response results rotor angle, frequency and voltage indicates the system is still stable. On the timing of the termination of the critical (CCT), the value of CCT on the system in 2018 can be found at 120 ms - 140 ms (the limit on large systems CCT), but in 2020 the system remains in a stable state when the three phase short circuit. So the determination of CCT (Critical Clearing Time) exceeds the limit on the value of CCT for large systems.

Keywords: *Transient Stability, generator trip, line trip, Single Pole Auto Reclosing, Critical Clearing Time,*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xix

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Permasalahan	2
1.3	Batasan Masalah	2
1.4	Tujuan dan Manfaat	2
1.5	Metodologi.....	3
1.6	Sistematika Penulisan	4

BAB 2 DASAR TEORI

2.1	Definisi Kestabilan	6
2.2	Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	6
	2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	7
	2.2.2 Kestabilan Frekuensi	13
	2.2.3 Kestabilan Tegangan	13
2.3	Kestabilan Transien	15
	2.3.1 Kestabilan Transien Multimesin.....	17
2.4	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	18
2.5	Pemodelan pada Studi Kestabilan.....	22
	2.5.1 Pemodelan Generator Sinkron	22
	2.5.2 Pemodelan Beban.....	22
2.6	Pengaturan frekuensi.....	23
	2.6.1 Governor	23
	2.6.2 Speed Droop Governor	23

2.7	Pengaturan Tegangan	26
2.8	Standar yang Berkaitan dengan Efek Transien.....	27
2.8.1	Standar <i>Undervoltage</i>	27
2.8.2	Standar <i>Voltage Sagging</i>	27
2.8.3	Standar Frekuensi.....	29

BAB 3 SISTEM KELISTRIKKAN TRANSMISI SUMATERA UTARA

3.1	Sistem Kelistrikan di Sumatera Utara	31
3.2	Data Kontrol Generator	45
3.3	Metordologi Simulasi	46

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Pemodelan Sistem Kelistrikan Sumatera Utara	49
4.2	Hasil Simulasi Stabilitas Transien	49
4.2.1	Generator Lepas	50
4.2.2	Satu saluran dari saluran ganda lepas	57
4.2.3	Saluran ganda lepas	64
4.2.4	<i>Single Pole Auto Reclosing</i>	71
4.2.5	Waktu Pemutusan Kritis	78

BAB 5PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	93
5.2.	Saran	93

DAFTAR PUSTAKA 95

LAMPIRAN (*SINGLE LINE DIAGRAM*)

BIODATA PENULIS

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Tegangan Nominal Kondisi Normal.....27
Tabel 2.2	<i>Voltage Sagging</i> Menurut Standar SEMI F4728
Tabel 3.1	Data Saluran Transmisi Sumatera Utara.....32
Tabel 3.2	Data Pembangkit Sumatera Utara 2018.....36
Tabel 3.3	Data Pembangkit Sumatera Utara 2020.....37
Tabel 3.4	Data Beban Sumatera Utara 201838
Tabel 3.5	Data Beban Sumatera Utara 2020.....42
Tabel 3.6	Pemodelan Dinamis46
Tabel 4.1	Summary of Total Generation49
Tabel 4.2	Nilai CCT pada saluran bus Paya Geli – B.Gingging.....91

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga..... 7
Gambar 2.2	Single Line Diagram Sistem Dua Mesin..... 9
Gambar 2.3	Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin..... 9
Gambar 2.4	Diagram Phasor Sistem Dua Mesin 10
Gambar 2.5	Diagram Skema untuk Studi Kestabilan 10
Gambar 2.6	Kurva Sudut Daya Karakteristik Respon Generator pada Keadaan Gangguan..... 16
Gambar 2.7	Representasi Rotor Generator dengan Arah Rotasi dari Torsi Mekanik dan Torsi Elektrik. 19
Gambar 2.8	Blok Diagram Sistem Pembangkit Listrik 23
Gambar 2.9	Blok Diagram Governor Mode Droop25
Gambar 2.10	Respon Governor Mode Droop25
Gambar 2.11	Blok Diagram Governor Mode Isoch.....27
Gambar 2.12	Respon Governor Mode Isoch 26
Gambar 2.13	Standar <i>Voltage Sagging</i> Menurut SEMI F47 28
Gambar 2.17	Standar Frekuensi 29
Gambar 4.1	Respon Sudut rotor ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – peak)trip 51
Gambar 4.2	Respon frekuensi ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – peak)trip 51
Gambar 4.3	Respon tegangan ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – peak)trip 52
Gambar 4.4	Respon Sudut rotor ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – light)trip 52
Gambar 4.5	Respon frekuensi ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – light)trip 53
Gambar 4.6	Respon tegangan ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – light)trip 53
Gambar 4.7	Respon Sudut rotor ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1 (2020 – peak)trip 54
Gambar 4.8	Respon frekuensi ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1 (2010 – peak)trip 54
Gambar 4.9	Respon tegangan ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1 (2010 – peak)trip 55

Gambar 4.10	Respon Sudut rotor ketika PLTA Asahan 3-1 (2020 – light)trip	55
Gambar 4.11	Respon frekuensi ketika PLTA Asahan 3-1 (2020 – light)trip	56
Gambar 4.12	Respon tegangan ketika PLTA Asahan 3-1 (2020 – light)trip	56
Gambar 4.13	Respon Sudut rotor ketika saluran 23 (2018 – peak) trip.....	58
Gambar 4.14	Respon frekuensi ketika saluran 23 (2018 – peak) trip.....	58
Gambar 4.15	Respon tegangan ketika saluran 23 (2018 – peak) trip.....	59
Gambar 4.16	Respon Sudut rotor ketika saluran 89 (2018 – lght) trip.....	59
Gambar 4.17	Respon frekuensi ketika saluran 89 (2018 – light) trip.....	60
Gambar 4.18	Respon tegangan ketika saluran 89 (2018 – light) trip.....	60
Gambar 4.19	Respon Sudut rotor ketika saluran 29 (2020 – peak) trip.....	61
Gambar 4.20	Respon frekuensi ketika saluran 29 (2020 – peak) trip.....	61
Gambar 4.21	Respon tegangan ketika saluran 29 (2020 – peak) trip.....	62
Gambar 4.22	Respon Sudut rotor ketika saluran 199 - 1 (2020 – light) trip.....	62
Gambar 4.23	Respon frekuensi ketika saluran 199 - 1 (2020 – light) trip.....	63
Gambar 4.24	Respon tegangan ketika saluran 199 – 1 (2020 – light) trip.....	65
Gambar 4.25	Respon Sudut rotor ketika saluran 23 (2018 – peak) trip.....	65
Gambar 4.26	Respon frekuensi ketika saluran 23 (2018 – peak) trip.....	66
Gambar 4.27	Respon tegangan ketika saluran 23 (2018 – peak) trip.....	66
Gambar 4.28	Respon Sudut rotor ketika saluran 121 (2018 – light) trip.....	67

Gambar 4.29	Respon frekuensi ketika saluran 121 (2018 – light) trip.....	67
Gambar 4.30	Respon tegangan ketika saluran 121 (2018 – light) trip.....	67
Gambar 4.31	Respon Sudut rotor ketika saluran 29 (2020 – peak) trip.....	68
Gambar 4.32	Respon frekuensi ketika saluran 29 (2020 – peak) trip.....	68
Gambar 4.33	Respon tegangan ketika saluran 29 (2020 – peak) trip.....	69
Gambar 4.34	Respon Sudut rotor ketika saluran 199 - 1 (2020 – light) trip.....	69
Gambar 4.35	Respon frekuensi ketika saluran 199 - 1 (2020 – light) trip.....	70
Gambar 4.36	Respon tegangan ketika saluran 199 – 1 (2020 – light) trip.....	70
Gambar 4.37	Respon Sudut rotor kasus Single pole auto reclosing saluran 23 (2018 – peak).....	72
Gambar 4.38	Respon frekuensi kasus Single pole auto reclosing saluran 23 (2018 – peak).....	72
Gambar 4.39	Respon tegangan kasus Single pole auto reclosing saluran 23 (2018 – peak).....	73
Gambar 4.40	Respon Sudut rotor kasus Single pole auto reclosing saluran 89 (2018 – light).....	73
Gambar 4.41	Respon frekuensi kasus Single pole auto reclosing saluran 89 (2018 – light).....	74
Gambar 4.42	Respon tegangan kasus Single pole auto reclosing saluran 89 (2018 – light).....	74
Gambar 4.43	Respon Sudut rotor kasus Single pole auto reclosing saluran 29 (2020 – peak).....	75
Gambar 4.44	Respon frekuensi kasus Single pole auto reclosing saluran 29 (2020 – peak).....	75
Gambar 4.45	Respon tegangan kasus Single pole auto reclosing saluran 29 (2020 – peak).....	76
Gambar 4.46	Respon Sudut rotor kasus Single pole auto reclosing saluran 89 (2020 – light).....	76
Gambar 4.47	Respon frekuensi kasus Single pole auto reclosing saluran 89 (2020 – light).....	77

Gambar 4.48	Respon tegangan kasus Single pole auto reclosing saluran 89 (2020 – light).....	77
Gambar 4.49	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 131 – 1 stabil (2018 – peak)	78
Gambar 4.50	Respon frekuensi kasus CCT saluran 131 – 1 stabil (2018 – peak)	79
Gambar 4.51	Respon tegangan kasus CCT saluran 131 – 1 stabil (2018 – peak)	79
Gambar 4.52	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 131 – 1 tidak stabil (2018 – peak)	80
Gambar 4.53	Respon frekuensi kasus CCT saluran 131 – 1 tidak stabil (2018 – peak)	80
Gambar 4.54	Respon tegangan kasus CCT saluran 131 – 1 tidak stabil (2018 – peak)	81
Gambar 4.55	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 166 stabil (2018 – light).....	81
Gambar 4.56	Respon frekuensi kasus CCT saluran 166 stabil (2018 – light).....	82
Gambar 4.57	Respon tegangan kasus CCT saluran 166 stabil (2018 – light).....	82
Gambar 4.58	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2018 – light).....	83
Gambar 4.59	Respon frekuensi kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2018 – light).....	83
Gambar 4.60	Respon tegangan kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2018 – light).....	84
Gambar 4.61	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 166 stabil (2020 – peak)	85
Gambar 4.62	Respon frekuensi kasus CCT saluran 166 stabil (2020 – peak)	85
Gambar 4.63	Respon tegangan kasus CCT saluran 166 stabil (2020 – peak)	86
Gambar 4.64	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2020 – peak)	86
Gambar 4.65	Respon frekuensi kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2020 – peak)	87
Gambar 4.66	Respon tegangan kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2020 – peak)	87

Gambar 4.67	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 166 stabil (2020 – light).....	88
Gambar 4.68	Respon frekuensi kasus CCT saluran 166 stabil (2020 – light).....	88
Gambar 4.69	Respon tegangan kasus CCT saluran 166 stabil (2020 – light).....	89
Gambar 4.70	Respon Sudut rotor kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2020 – light).....	89
Gambar 4.71	Respon frekuensi kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2020 – light).....	90
Gambar 4.72	Respon tegangan kasus CCT saluran 166 tidak stabil (2020 – light).....	90

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga listrik yang mampu melayani beban secara kontinyu, tegangan dan frekuensi yang konstan, fluktuasi tegangan dan frekuensi yang terjadi harus berada pada batas toleransi yang diizinkan. Hal ini agar peralatan listrik konsumen dapat bekerja dengan baik dan aman. Karena perubahan beban yang bervariasi akan berdampak pada kestabilan sistem. Perubahan yang signifikan dapat menyebabkan sistem keluar dari batas stabil. Oleh karena itu perubahan beban harus diikuti perubahan daya penggerak generator. Hal ini dimaksudkan agar terjadi keseimbangan antara daya beban dan daya suplai. Sehingga frekuensi dan tegangan sistem tetap terjadi pada posisi normal.

Gangguan merupakan salah satu factor penyebab ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Gangguan pada sisi suplai dapat menyebabkan generator trip, dan hal ini mengakibatkan ketidakseimbangan antara jumlah suplai daya dengan daya beban. Begitu juga dengan gangguan hubung singkat dan beberapa kasus yang mungkin terjadi pada sistem transmisi. Pada gangguan hubung singkat umumnya menyebabkan daya suplai lebih besar dari daya beban.

Sistem kelistrikan Sumatera Utara yang dipasok dengan menggunakan sistem Transmisi 150 kV dan 275 kV merupakan sistem transmisi dengan pusat beban terbesar di Sumatera. Dalam upaya memenuhi kebutuhan listrik, sesuai dengan RUPTL, Sistem Transmisi Sumatera Utara akan mengoperasikan PLTA Batang Toru dengan kapasitas 4 x 125 MW pada tahun 2020. Karena potensi sumber energi yang cukup besar di Sumatera Utara adalah tenaga air dan panas bumi. Dengan penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW, perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk mengetahui kestabilan sistem saat terjadi gangguan transien. Dari

gangguan yang dipilih dapat dilihat gangguan mana yang memiliki efek paling besar untuk kestabilan transien.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana Stabilitas transient pada system kelistrikan Sumatera Utara sebelum penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW (2018).
2. Bagaimana Stabilitas transient pada sistem kelistrikan Sumatera Utara setelah penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW (2020).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Analisa kestabilan Transient di Sumatera Utara dilakukan dengan memperhatikan sudut rotor generator, frekuensi dan tegangan pada bus
2. Gangguan yang dianalisa adalah efek transien dikarenakan generator lepas, 1 line trip, 2 line trip, *auto single pole reclosing*, dan *critical clearing time* dengan masing – masing gangguan diambil 1 case dari setiap tahunnya.
3. Software bantu yang digunakan adalah ETAP 12.6.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Penelitian pada tugas akhir ini memiliki tujuan dan manfaat sebagai berikut :

1. Melaksanakan studi analisis kestabilan transient system kelistrikan Sumatera Utara sebelum dan setelah penambahan PLTA Batang Toru 4 x125 Mw.
2. Mengetahui efek transien pada sistem transmisi Sumatera Utara dengan beberapa kasus yang dipiilh.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur.
Pada tahap ini dilakukan studi literatur yang menunjang penulisan tugas akhir. Studi literatur meliputi pembelajaran materi-materi yang dapat membantu dalam penelitian. Literatur ini dapat diambil dari berbagai sumber antara lain buku, jurnal, *proceeding*, dan artikel di internet.
2. Pengumpulan data.
Pada tahap ini data-data sistem kelistrikan dan single line diagram sistem transmisi Sumatera Utara dikumpulkan, yang meliputi: data daya pembangkitan generator, data jaringan saluran transmisi, data beban pada di sistem
3. Pengolahan Data
Pada tahap ini data – data yang diperoleh akan disesuaikan dengan jenis format yang dibutuhkan untuk simulasi dengan komputer
4. Pemodelan dan Simulasi
Setelah pengolahan data dilakukan pemodelan dan simulasi menggunakan ETAP 12.6 terhadap sistem kelistrikan Sumatera Utara
5. Analisa Data
Dari simulasi akan didapatkan suatu hasil yang nantinya akan diaalisis. Data yang akan dianalisis adalah stabilitas transien yang terjadi pada sistem kelistrikan Sumatera Utara yang kemudian dijadikan referensi dalam perencanaan skema pelepasan beban.
6. Penarikan kesimpulan
Pada tahap ini ditarik kesimpulan dari hasil simulasi dan analisis yang diperoleh.

1.6 Sistematika penulisan

Untuk memudahkan pembahasan yang akan dilakukan, tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis.

BAB II : STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB III : SISTEM KELISTRIKAN TRANSMISI SUMATERA UTARA.

Dalam bab ini dijelaskan metode pelaksanaan studi serta penerapannya dalam studi kasus pada sistem Transmisi Sumatera Utara , bagaimana konfigurasinya dan beberapa hal mengenai operasi sistemnya.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Dalam bab ini dibahas mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan. Dalam bab ini akan disajikan analisis berupa beberapa respon frekuensi, sudut rotor, dan tegangan dengan beberapa case yang dilakukan untuk mengetahui apakah sistem stabil atau tidak.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi

BAB II

STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK

Sebelum masuk ke Stabilitas Sistem Tenaga Listrik lebih baiknya untuk lebih dahulu memahami sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik adalah sebuah rangkaian dari tempat pembangkitan energi listrik sampai pada konsumen, yaitu melalui penyaluran dan distribusi sehingga tempat pembangkitan yang sekiranya lokasi jauh dari konsumen (masyarakat) dapat dinikmati. Sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi :

- **Pusat Pembangkit Listrik (Power Plant)**
Merupakan sebuah tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, di mana terdapat turbin sebagai penggerak mula (primeover) dan generator yang membangkitkan listrik. Pada pusat pembangkit terdapat Gardu Induk (GI). Jenis pusat pembangkit secara umum di antaranya adalah PLTA ,PLTU, PLTG, PLTGU, PLTN.
- **Saluran Transmisi (Transmission Line)**
Saluran transmisi berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit yang umumnya terletak jauh dari pusat beban. sebelum ke distribusi dan beban, energi listrik dari pembangkit disalurkan terlebih dahulu ke saluran transmisi yang akan dinaikkan tegangannya agar rugi – rugi daya dapat diminimalkan. Contoh saluran transmisi di Indonesia adalah SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) 70 – 150 kV, SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi) 500 kV.
- **Sistem Distribusi**
Merupakan sub sistem tersendiri yang terdiri dari Pusat Pengatur Distribusi, Saluran Tegangan menengah (6 kV dan 20 kV distribusi primer) yang merupakan saluran udara kabel atau kabel tanah, Gardu Distribusi tegangan menengah yang terdiri dari panel – panel pengatur tegangan menengah dan trafo sampai dengan panel – panel distribusi tegangan rendah (380 V, 220 V) yang menghasilkan tegangan kerja untuk industri dan konsumen perumahan.

2.1 Definisi Kestabilan

Kestabilan secara umum didefinisikan sebagai kemampuan terbangkitnya gaya atau momen untuk melawan gangguan yang terjadi dan mengembalikan sikap benda ke kondisi seimbang. Kondisi stabil sistem tenaga listrik terjadi jika ada keseimbangan antara pembangkit dan beban sehingga apabila terjadi ketidakseimbangan akan mencari sebuah kondisi operasi mantap yang baru.

Usaha untuk mengembalikan kondisi sinkron yang baru disebut periode transien. Sedangkan pada kondisi mantap kerja disebut kerja dinamis. Kriteria utama stabilitas adalah bagaimana mesin – mesin mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien.

2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

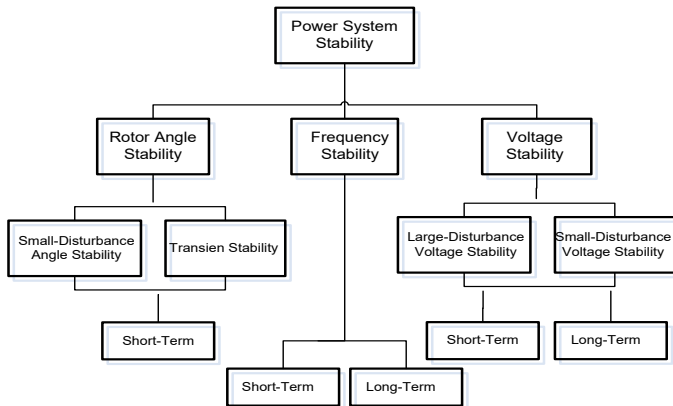
Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk tetap dapat beroperasi setimbang saat dan setelah terjadi gangguan.

Stabilitas sistem tenaga biasanya didefinisikan sebagai sifat dari power system akan berada pada kondisi keseimbangan baik pada kondisi normal maupun abnormal. Pada mesin sinkron yang terinterkoneksi agar stabil mesin harus mempertahankan kondisi sinkronisasi pada kondisi normal dan abnormal.

Steady state adalah daerah operasi sebuah sistem dengan karakteristik perubahan yang lambat atau bertahap, atau dapat disebut juga kemampuan dari suatu sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi antara mesin – mesin setelah mengalami gangguan.

Kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3, yaitu :

- a. Kestabilan Sudut Rotor
- b. Kestabilan Frekuensi
- c. Kestabilan Tegangan



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Power Sistem

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin sinkron yang terhubung dengan sistem untuk tetap sinkron setelah terjadi gangguan. Ketidakstabilan akan mengakibatkan naiknya sudut rotor yang berbeda – beda dari generator, sehingga dapat mengakibatkan generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator lain. Faktor utama pada masalah ini adalah cara di mana output daya pada mesin sinkron bervariasi sesuai osilasi rotor. Pada kestabilan sudut rotor dibagi menjadi 2 sub kategori, yaitu :

- ***Small Disturbance*** (Gangguan kecil) rotor angle stability

Yaitu kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi terhadap gangguan kecil. Small-disturbance ini tergantung pada keadaan awal operasi sistem. Ketidakstabilan mungkin timbul karena 2 hal yaitu i) peningkatan sudut rotor pada mode non osilasi dan tidak periodic karena kurangnya torsi sinkronisasi. ii) Osilasi sudut rotor meningkat karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

- ***Large Disturbance*** (Gangguan besar)

Gangguan ini biasa disebut sebagai transient stability. Yaitu kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang parah. Seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem yang dihasilkan besarnya sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh adanya hubungan sudut daya.

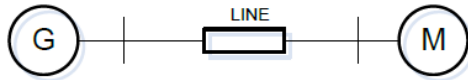
Kestabilan transien bergantung pada kondisi awal sistem operasi dan tingkat keparahan dari gangguan yang terjadi. Ketidakstabilan biasanya menghasilkan sudut baru karena torsi sinkronisasi tidak cukup. Sehingga mewujudkan ketidakstabilan ayunan pertama. Tapi dalam sistem tenaga listrik yang besar mungkin tidak selalu terjadi ketidakstabilan ayunan pertama, melainkan bisa menjadi hasil dari superposisi dari mode ayunan interarea yang lambat, sehingga menyebabkan ketidakstabilan melebihi ayunan pertama.

Perubahan torsi elektromekanik pada mesin sinkron yang mengalami gangguan dapat dibagi menjadi dua komponen :

- Komponen torsi sinkron, pada fasa dengan penyimpangan sudut rotor
- Komponen torsi peredam (Damping torque), pada fasa dengan penyimpangan kecepatan.

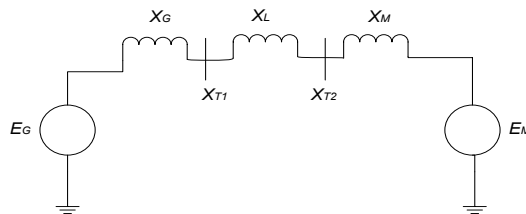
Kestabilan sistem tergantung pada kedua komponen torsi tersebut untuk masing-masing mesin sinkron. Kurangnya torsi sinkron akan menghasilkan ketidak stabilan tanpa osilasi, sebaliknya kekurangan torsi peredam akan menghasilkan ketidakstabilan yang disertai dengan osilasi [2].

Karakteristik yang paling penting dalam kestabilan tenaga listrik adalah karakteristik hubungan daya dengan posisi rotor pada mesin sinkron



Gambar 2.2 Single Line Diagram Sistem Dua Mesin

Pada Gambar 2.2. tersebut mengilustrasikan dua buah mesin sinkron dimana keduanya saling terhubung melalui sebuah saluran transmisi yang memiliki reaktansi. Reaktansi saluran transmisi yang diperhitungkan pada kasus ini hanyalah nilai reaktansi induktif X_L sedangkan untuk resistansi dan kapasitansi saluran diabaikan karena nilainya relative kecil. Generator sinkron yang mesuplai daya diwakili oleh mesin G sedangkan motor sinkron diwakili oleh mesin M. Single line pada Gambar 2.2. di atas dapat diubah menjadi diagram impedansi seperti Gambar 2.3. di bawah:



Gambar 2.3 Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin

Di mana :

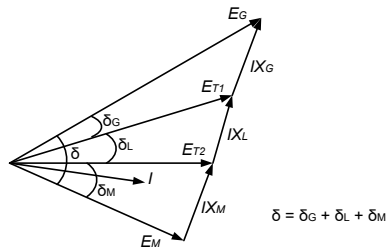
- E_G = Tegangan internal generator.
- E_M = Tegangan internal motor.
- X_G = Reaktansi internal generator.
- X_M = Reaktansi internal motor.
- X_T = Reaktansi saluran.

Daya generator yang digunakan untuk mesuplai motor merupakan fungsi pembeda sudut δ antara rotor kedua mesin. Perbedaan sudut δ tersebut timbul akibat adanya ketiga komponen yaitu sudut internal generator, perbedaan sudut antara tegangan pada generator dan motor, sudut internal motor.

Sudut internal generator δ_G adalah sudut dimana rotor generator yang mendahului medan putar pada stator. δ_L adalah sudut dimana

tegangan generator mendahului tegangan motor. Sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar pada stator motor dinamakan sudut internal motor δ_M .

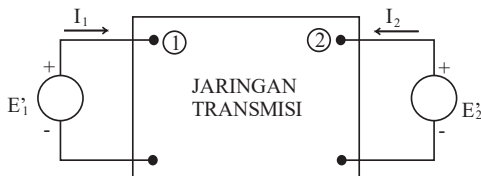
Dari ketiga komponen diatas, diagram fasor yang menunjukkan bagaimana bentuk hubungan antara tegangan internal motor EM dan dengan tegangan internal generator EG dapat dilihat pada gambar di bawah:



Gambar 2.4 Diagram Fasor Sistem Dua Mesin

Dari Gambar 2.4 di atas dapat diperoleh suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut [2].

Untuk mempermudah mencari persamaan sudut daya, maka Gambar 2.3. akan dirubah menjadi sebuah skema sederhana yang biasa digunakan untuk studi kestabilan. Dimana tegangan peralihan generator dimisalkan sebagai E'_1 dan tegangan motor dimisalkan sebagai E'_2 . Sedangkan reaktansi generator, jaringan transmisi serta reaktansi motor dijadikan satu dan dimasukkan ke dalam sebuah kotak, sehingga tampak seperti Gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Diagram Skema untuk Studi Kestabilan

Dari Gambar 2.5 di atas bisa didapatkan:

$$Y_{rel} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

Persamaan umum aliran daya adalah sebagai berikut berikut ini:

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (2.2)$$

Kemudian dengan membuat nilai k dan N berturut-turut sama dengan 1 dan 2, serta mengganti variabel V dengan E'_2 maka dapat memperoleh persamaan:

$$P_1 + Q_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 (Y_{12} E'_2)^* \quad (2.3)$$

Jika didefinisikan:

$$E'_1 = |E'_1| \angle \delta_1 \quad E'_2 = |E'_2| \angle \delta_2 \quad (2.4)$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \delta_{12} \quad (2.5)$$

Akan didapatkan:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{11}| \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.6)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{11}| \sin(\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.7)$$

Persamaan juga berlaku untuk rel 2 dengan saling menukarkan *subscript* pada kedua persamaan tersebut.

Jika kita misalkan :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.8)$$

dan menetapkan sudut baru γ sedemikian rupa sehingga

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2} \quad (2.9)$$

jika dimasukkan pada persamaan 2.6, maka akan diperoleh:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{11}| \sin(\delta - \gamma) \quad (2.10)$$

Persamaan di atas dapat juga dituliskan dengan lebih sederhana sebagai

$$P_e = P_c + P_{max} \sin(\delta - \gamma) \quad (2.11)$$

Pada persamaan 2.11 di atas variabel P_e mewakili keluaran daya listrik dari generator (rugi jangkar diabaikan). Persamaan ini disebut dengan persamaan sudut-hari. Parameter P_c , P_{maks} , dan δ adalah konstanta untuk konfigurasi jaringan tertentu, besaran tegangan $|E'_1|$ dan $|E'_2|$ juga merupakan sebuah konstanta. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, jaringan dianggap tanpa resistansi dan semua unsur dari Y_{rel} adalah susceptansi maka G_{11} dan γ keduanya bernilai nol. Sehingga persamaan sudut-hari yang didapatkan berlaku untuk jala-jala reaktansi murni adalah merupakan persamaan seperti yang sudah kita semua ketahui yaitu:

$$P_e = \frac{|E'_1||E'_2|}{X} \sin \delta \quad (2.12)$$

dimana:

$$X = X_G + X_L + X_M \quad (2.13)$$

dan X adalah reaktansi transfer antara E'_1 dan E'_2 atau sesuai dengan Gambar 2.3 [3]

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan dari sistem tenaga mempertahankan frekuensi untuk tetap stabil ketika terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan. Biasanya gangguan ini berupa perubahan pembangkit atau beban yang signifikan. Gangguan – gangguan yang terjadi pada sistem frekuensi :

1. Penyimpangan terus menerus (Continuous Deviation) : frekuensi berada di luar batasnya pada saat yang lama (secara

terus menerus) frekuensi standart 50 Hz dengan toleransi 0,6 Hz.

2. Penyimpanan sementara (Transient Deviation) : penurunan atau kenaikan frekuensi secara tiba –tiba dan sesaat.

2.2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan kemampuan dari sistem tenaga mempertahankan tegangan untuk tetap stabil pada semua bus yang erjadi gangguan. Hal ini tergantung dari sistem untuk tetap mempertahankan keseimbangan antara suplay daya dan beban. Gangguan – gangguan yang terjadi pada tegangan meliputi :

1. Fluktuasi Tegangan

Tegangan lebih pada sistem akan mengakibatkan arus listrik yang mengalir menjadi besar dan mempercepat kemunduran isolasi (deterioration of insulation) sehingga menyebabkan kenaikan rugi –rugi daya dan operasi memperpendek umur kerja peralatan tersebut. Peralatan – peralatan yang dipengaruhi saat terjadi tegangan lebih adalah transformer, motor – motor listrik, kapasitor daya, dan peralatan kontrol yang menggunakan coil / kumparan seperti solenoid valve, magnetic switch, dan relay. Tegangan lebih biasanya disebabkan oleh eksitasi yang berlebihan pada generator listrik (over excitation), sambaran petir pada saluran transmisi, proses pengaturan atau beban kapasitif yang berlebihan ada sistem distribusi.

Tegangan turun pada sistem akan mengakibatkan berkurangnya intensitas cahaya (redup) pada peralatan penerangan, bergetar dan terjadi kesalahan operasi pada peralatan kontrol seperti automatic valve, magnetic switch, dan auxiliary relay, menurunnya relay pada saat start moto-motor listrik. Tegangan turun biasanya disebabkan oleh kurangnya eksitasi pada generator listrik (drop excitation), saluran transmisi yang terlalu panjang, jarak beban yang terlalu jauh

dari pusat distribusi atau peralatan yang sudah berlebihan beban kapasitifnya. Misalnya tegangan lebih (Over Voltage), Tegangan turun (Dro Voltage) dan tegangan getar (flicker Voltage).

2. Tegangan Kedip (Dip Voltage)

Tegangan kedip adalah turunnya tegangan (umumnya sampai 20%) dalam periode waktu yang sangat singkat (ms). Penyebabnya adalah hubungan singkat antara fasa dengan tanah atau fasa dengan fasa pada jaringan distribusi. Tegangan kedip dapat menyebabkan gangguan pada stabilisator tegangan arus DC, electromagnetic switch, variable speed motor, high voltage discharge lamp, dan under voltage relay.

3. Ketidakseimbangan tegangan

Ketidakseimbangan tegangan (unbalance voltage) umumnya terjadi di sistem distribusi karena pembebanan fasa yang tidak merata.

Gangguan – gangguan yang telah dijelaskan di atas dapat menyebabkan peralatan yang bekerja tidak normal, dan yang paling fatal adalah rusaknya peralatan yang sampai terbakar. Pada sistem tenaga yang non linear, kestabilan tergantung atas kondisi awal dan ukuran gangguan. Konsekuensinya, kestabilan sudut dan tegangan dapat dibagi menjadi kestabilan dengan gangguan kecil dan besar.

2.3 Kestabilan Transien

Kestabilan Transien adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak dalam waktu satu swing yang pertama. Dengan asumsi pengatur tegangan otomatis (AVR) dan Governor belum bekerja.

Pada analisis kestabilan transien menggunakan pendekatan model non linear. Kestabilan transien merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan. Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan

atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas transien harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (shock) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi.

Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba – tiba, keseimbangan antara energi input dan output listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi inersia rotor mesin yang masih bekerja pada periode yang singkat akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada mesin akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

Study kestabilan transien bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadi gangguan besar seperti terputusnya sistem pembangkit, short circuit, dan perubahan beban yang mendadak.

Masalah kestabilan transien menyangkut gangguan besar yang tidak lagi memungkinkan proses kelinieran, sehingga persamaan tidak linear differensial dan aljabar harus diselesaikan dengan metode langsung atau dengan prosedur iterasi. Pekiraan yang biasa digunakan untuk transfer daya diberikan oleh :

$$P = \frac{V_t V_\infty}{x} \sin \delta \quad (2.14)$$

Dengan :

V_t : tegangan terminal mesin (volt)

V_∞ : tegangan *infinite* bus (volt)

P : Daya (watt)

δ : Sudut rotor (derajat)

tersebut tidak cukup besar maka sudut rotor atau daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem menjadi hilang [7].

2.3.1 Kestabilan Transien Multimesin

Pada umumnya jika terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik skala besar, hanya beberapa (atau bahkan satu) mesin saja yang paling terganggu atau terpengaruh oleh gangguan tersebut. Mesin yang paling terganggu bisa ditentukan dengan mengamati daya percepatan tiap mesin pada saat gangguan. Dengan mengamati batas kestabilan sistem yang paling terganggu, hal tersebut sudah cukup untuk menentukan kestabilan transien keseluruhan sistem. Mesin-mesin yang terganggu bisa memiliki batas kestabilan berbeda, tetapi mesin yang memiliki batas kestabilan terendah bisa dikatakan sebagai mesin yang paling kritis. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadi gangguan mesin paling kritis akan kehilangan sinkronisasi pertama kali (karena memiliki batas kestabilan terendah) dan secara berurutan akan menyebabkan mesin yang lain akan mengalami kondisi yang sama sehingga membentuk suatu kelompok mesin yang tidak stabil dalam jumlah yang besar.

Jika dimisalkan mesin i adalah mesin kritis, seperti pada sistem single machine infinite bus (SIMB), batas kestabilan mesin kritis bisa diketahui dari variasi kecepatan dan daya percepatannya pada kondisi setelah gangguan (postfault). Lintasan postfault mesin ke i bisa dianggap stabil (first-swing) jika sudut mesin mencapai harga puncak (kecepatan nol) sementara daya percepatannya negatif.

$$\begin{aligned}\omega_i &= 0 \\ P_{ai} &< 0\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, lintasan postfault mesin kritis bisa dianggap tidak stabil jika sudutnya terus naik ketika daya percepatannya menjadi nol atau berubah tanda :

$$\omega_i > 0$$

$$P_{ai} = 0$$

Lintasan kritis bisa ditentukan oleh kejadian dimana kecepatan dan daya percepatan sama dengan nol pada waktu yang bersamaan pada kondisi setelah terjadi gangguan.

$$\omega_i = 0$$

$$P_{ai} = 0$$

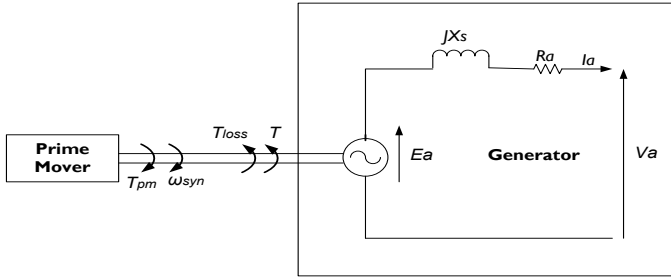
2.4 Dinamika Rotor dan Persaman Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.15)$$

Simbol-simbol pada persamaan 2.15 mempunyai arti sebagai berikut:

J	= Momen kelembaman total dari massa rotor dalam $kg \cdot m^2$
θ_m	= Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (<i>stationary</i>), dalam radian mekanis
t	= Waktu, dalam detik
T_a	= Momen putar percepatan bersih, dalam Nm
T_m	= Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (<i>retarding</i>) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam Nm
T_e	= Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm



Gambar 2.7 Representasi Rotor Generator dengan Arah Rotasi dari Torsi Mekanik dan Torsi Elektrik.

Pada persamaan (2.15) karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.16)$$

dengan θ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan diatas terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.17)$$

Dari persamaan (2.17) dan (2.15) maka didapatkan

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.18)$$

Jika persamaan 2.18 diatas dikalikan dengan ω_m maka :

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.19)$$

Dengan $J\omega_m$ adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m \quad (2.20)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.21)$$

Bila ω_m tidak berubah sebelum stabilitas hilang maka M di evaluasi dengan kecepatan serempak sebagai berikut:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.22)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan moment sudut adalah:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.23)$$

Jika p adalah jumlah kutub generator sinkron maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m$$

Maka persamaan ayunan dalam hubungannya dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{P} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.24)$$

Bila persamaan 2.22 disubstitusikan ke persamaan 2.24 dan dibagi dengan daya dasar S_B . Akan menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} x \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.25)$$

Sekarang mendefinisikan suatu besaran yang dikenal sebagai konstanta H. Konstanta H didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi dengan rating mesin (MVA) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.26)$$

Substitusikan persamaan 2.26 kedalam persamaan 2.25 maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} x \frac{2H}{\omega_{sm}} x \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.27)$$

Kecepatan listrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik

$\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_0$ Sehingga persamaannya menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_0} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.28)$$

δ adalah posisi angular dari rotor dalam electrical radian yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron dan δ_0 adalah nilai pada saat $t = 0$,

$$\delta = \omega_r t - \omega_0 t + \delta_0 \quad (2.29)$$

Jika diturunkan terhadap waktu, didapatkan

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r \quad (2.31)$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} \\ &= \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Jika komponen torsi redaman (*damping*) disertakan kedalam persamaan 2.28 maka persamaan ayunan tersebut menjadi seperti berikut :

$$\frac{2H}{\omega_0} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - K_D \Delta \bar{\omega}_r \quad (2.33)$$

2.5 Pemodelaan pada Studi Kestabilan Transien

2.5.1. Pemodelan Generator Sinkron

Pemodelan mesin sinkron yang paling sederhana untuk analisis kestabilan adalah dengan menggunakan model klasik, dimana dalam model klasik ini rotor kutub menonjol diabaikan dan mesin digambarkan sebagai tegangan konstan E' dengan reaktansi persen direct-axis-transient X'_d .

2.5.2. Pemodelan Beban

Terdapat tiga jenis model beban sederhana yang digunakan pada analisis kestabilan, ketiga model tersebut adalah:

1. Konstan impedansi.
2. Konstan kVA/konstan power.
3. Konstan arus.

Model konstan impedansi biasa digunakan untuk merepresentasikan beban statis dan model konstan arus biasa digunakan untuk merepresentasikan penyearah yang dapat dikontrol. Ciri impedansi konstan adalah beban-beban yang tidak menggunakan regulator. Misalkan lampu, kipas angin.

Model kVA/konstan power yaitu beban-beban yang berusaha mempertahankan daya apabila salah satu komponen V atau I nya turun. Jadi misalkan V turun maka I akan naik untuk mempertahankan supaya daya konstan. Untuk motor induksi yang berada jauh dari gangguan biasa menggunakan model konstan kVA. contohnya mesin-mesin listrik di industri kimia.

Model konstan arus yaitu beban-beban yang berusaha mempertahankan arus tetap konstan.

2.6 Pengaturan Frekuensi

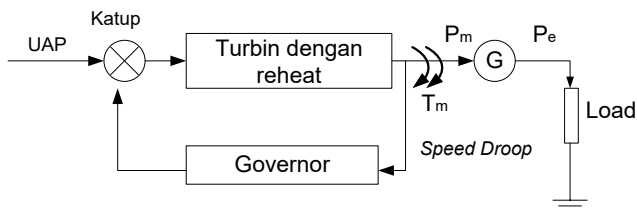
2.6.1 Governor

Governor merupakan turbin uap yang dilengkapi dengan *frequency control* dan merupakan peralatan pengaturan *control valve*. Governoor ini berfungsi untuk mengatur atau menjaga frekuensi sistem, sehingga apabila terjadi gangguan yang bersifat mendadak sistem maka governor akan menyesuaikan supaya frekuensi tetap stabil [8].

Prinsip kerjanya turbin uap dilengkapi dengan *frequency control* dan merupakan peralatan pengaturan *control valve*. *Control valve* akan membuka untuk menambah kapasitas Uap/ Bahan bakar ketika frekuensi turun dari nominal atau sebaliknya, akan menutup untuk mengurangi kapasitas Uap/ Bahan bakar ketika frekuensi naik. Pengertian ini umum dikenal *speed governor*.

2.6.2 Speed Droop Governor

Speed Droop adalah bilangan prosentase yang menyatakan kepekaan turbin merespon perubahan frekuensi. Semakin kecil nilai prosentase *speed droop*, maka semakin peka terhadap perubahan frekuensi. Demikian pula sebaliknya, semakin besar nilai prosentase *speed droop*, maka semakin malas merespon perubahan frekuensi. Konsep dasar *speed droop* akan lebih mudah dipahami melalui Gambar 2.11 diagram blok *speed droop governor*.



Gambar 2.8 Blok Diagram Sistem Pembangkit Listrik

Speed droop menentukan hubungan antara sinyal pengaturan putaran (*governor*) dengan output beban yang dibangkitkan oleh

Generator. *Speed Droop* merupakan perbandingan beban dengan frekuensi.

$$\text{Speed Droop} = \frac{R1 - R2}{R} \times 100\%$$

dimana : R = putaran nominal

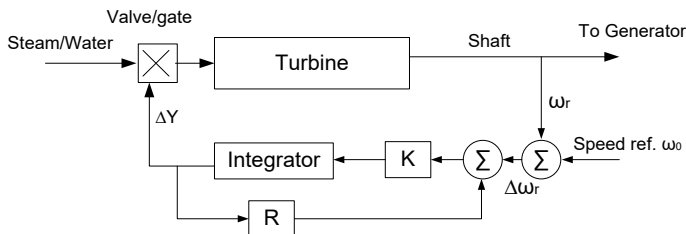
R1 = putaran tanpa beban

R2 = putaran beban penuh

Makin kecil nilai *speed droop* dari *governor* maka makin peka terhadap perubahan beban. jika pada suatu pembangkit memiliki nilai *speed droop* sebesar 5 %. maka dapat dihitung: $5\% = 0.05 \times 50\text{Hz} = 2.5\text{Hz}$. Artinya sistem dibatasi untuk penurunan frekuensi maksimal 2.5 Hz dari batas nominal 50 Hz.

Mode Governor ada 2 yaitu :

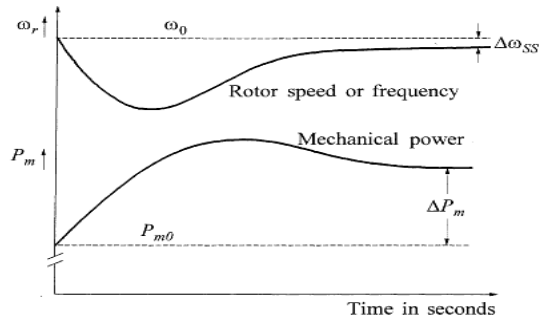
a. Droop



Gambar 2.9 Blok Diagram Governor Mode Droop

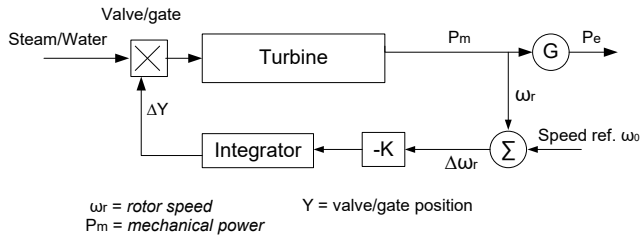
Pada Gambar 2.12 Mode Droop, governor sudah memiliki "setting point" P_{mech} (daya mekanik) yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan. Dengan adanya "fixed setting" ini, output daya listrik generator nilainya tetap dan adanya perubahan beban tidak akan mengakibatkan perubahan putaran turbin (daya berbanding lurus dengan putaran). R adalah parameter *speed droop* .

Berikut adalah respon dari mode droop:



Gambar 2.10 Respon Governor Mode Droop

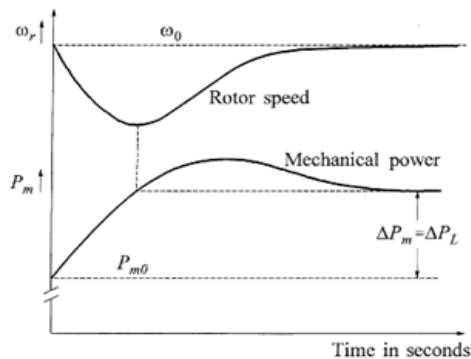
b. Isoch



Gambar 2.11 Blok Diagram Governor Mode Isoch

Pada Gambar 2.14 Mode Isonchronous : "set point" putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya listrik sistem pada saat itu (real time). Kemudian melalui internal proses di dalam governor (sesuai dengan kontrol logic dari manufaktur), governor akan menyesuaikan nilai output daya mekanik turbin supaya sesuai dengan daya listrik yang dibutuhkan sistem. Pada saat terjadi perubahan beban, governor akan menentukan setting point yang baru sesuai dengan aktual beban sehingga dengan pengaturan putaran ini diharapkan frekuensi listrik generator tetap berada di dalam "acceptable range" dan generator tidak mengalami "out of synchronization".

Berikut adalah respon dari setting governor mode Isoch



Gambar 2.12 Respon Governor Mode Isoch

2.7 Pengaturan Tegangan

Tegangan, arus dan daya adalah besaran-besaran pada saluran transmisi yang perlu diamati untuk keperluan operasi sistem tenaga listrik. Langkah-langkah pengaturan operasi yang dilakukan adalah pengaturan sumber-sumber daya aktif maupun sumber daya reaktif.

Pengaturan tegangan erat kaitannya dengan pengaturan daya reaktif dalam sistem dan pengaturan frekuensi erat hubungannya dengan pengaturan daya aktif sistem. Adapun pengaturan tegangan dipengaruhi oleh :

- Arus penguat generator
- Daya reaktif beban
- Daya reaktif yang didapat dalam sistem (selain dari generator) misalkan dari kondensator dan dari reactor
- Posisi tap transformator .

Dalam sistem tenaga listrik sekarang ini pengaturan tegangan dapat dilakukan secara otomatis. Salah satunya menggunakan *Automatic voltage Regulator (AVR)*. AVR berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada

perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator.

Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (excitacy) pada exciter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (excitacy) pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output Generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (excitacy) pada exciter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output Generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis.

2.8 Standar yang Berkaitan dengan Efek Transien

2.8.1 Standar *Undervoltage*

Undervoltage adalah penurunan nilai efektif dari tegangan yang nilainya kurang dari 90 persen dari tegangan nominal dan durasinya lebih lama dari satu menit. *Undervoltage* biasanya disebabkan oleh peristiwa gangguan. pembebanan yang berlebihan juga dapat mengakibatkan *Undervoltage*.. Tegangan sistem harus dipertahankan dengan batasan sebagai berikut :

Tabel 2.1 Tegangan Nominal Kondisi Normal

Rating Tegangan (kV)	Batasan Over voltage (%)	Batasan Under voltage (%)
500	+5%	-5%
150	+5%	-10%
70	+5%	-10%
20	+5%	-10%

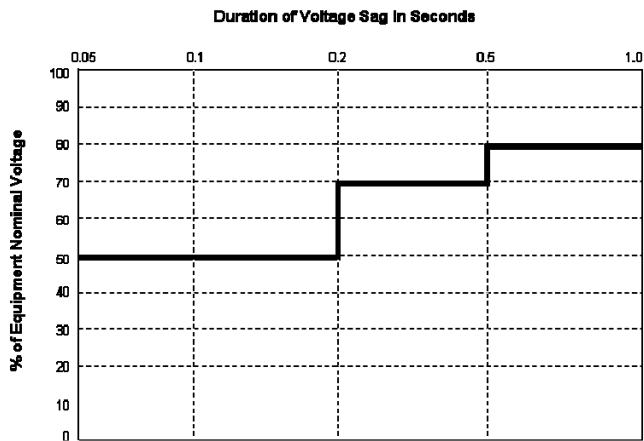
2.8.2 Standart *Voltage Sagging*

Salah satu efek dari transien, adalah penurunan tegangan dalam waktu yang singkat. Penurunan tegangan dalam waktu yang sekejap, dinamakan kedip tegangan (*Voltage Sagging*). Kedip Tegangan didefinisikan sebagai fenomena penurunan magnitude tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama interval waktu (t). Biasanya

disebabkan oleh sistem *fault*, energization beban besar ataupun *starting* dari motor-motor besar.

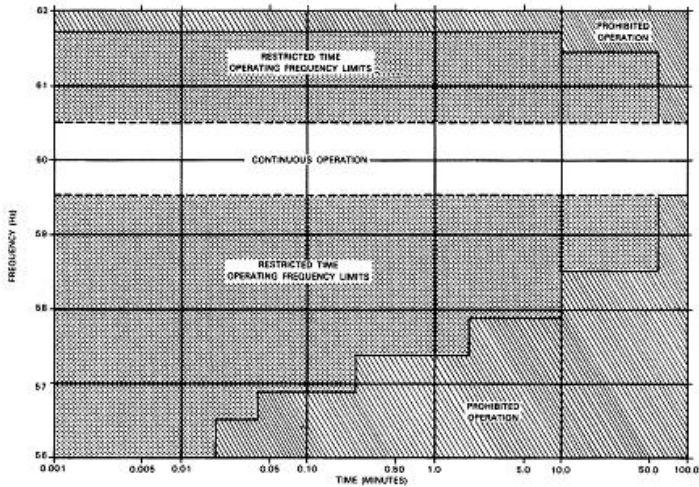
Tabel 2.2 *Voltage Sagging* Menurut Standar SEMI F47

VOLTAGE SAG DURATION			VOLTAGE SAG
Second (s)	Cycles at 60 Hz	Cycles at 50 Hz	Percent (%) of Equipment Nominal Voltage
< 0.05 s	< 3 cycles	< 2.5 cycles	Not specified
0.05 to 0.2 s	3 to 12 cycles	2.5 to 10 cycles	50 %
0.2 to 0.5 s	12 to 30 cycles	10 to 25 cycles	70 %
0.5 to 1.0 s	30 to 60 cycles	25 to 50 cycles	80 %
>1.0 s	> 60 cycles	> 50 cycles	Not specified



Gambar 2.13 Standar *Voltage Sagging* Menurut SEMI F47

2.8.3 Standar Frekuensi untuk *Steam Turbin Generator* (IEEE Std C37.106-2003)



Gambar 2.14 Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk *Steam Turbin Generator*

IEEE Std C37.106-2003 merupakan standar yang digunakan untuk proteksi frekuensi abnormal dari pembangkit dimana standar ini digunakan untuk sistem dengan frekuensi 60 Hz. Pada tugas akhir ini standar ini akan digunakan sebagai asumsi untuk standar frekuensi sistem 50 Hz.

Gambar 2.6. menunjukkan batas operasi frekuensi abnormal untuk *steam turbin* dimana daerah antara 59.5 Hz dan 60.5 Hz merupakan batas untuk operasi kontinu dari generator turbin uap. Sedangkan untuk daerah yang diarsir adalah daerah terlarang frekuensi abnormal dalam batas waktu tertentu. Sebagai contoh, frekuensi *steam turbin generator* hanya boleh turun menjadi 59.5 Hz selama 10 detik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN TRANSMISI SUMATERA UTARA

3.1. Data Kelistrikan Sumatera Utara

Sistem kelistrikan di Sumatera Utara dipasang dengan menggunakan sistem transmisi 150 kV, dan 275 kV. Namun secara umum sistem transmisi yang digunakan adalah 150 kV. Saluran antar bus menggunakan sistem *double circuit* (2 saluran) dan single circuit. Untuk saluran yang menghubungkan bus dengan kapasitas pembangkit yang besar menggunakan sistem *double circuit* dengan tujuan menjaga kontinuitas penyaluran daya listrik ketika salah satu bermasalah (terjadi gangguan). Maka daya listrik masih dapat disalurkan meskipun tidak 100% dari kondisi awal.

Sistem kelistrikan Sumatera Utara terdiri atas 72 bus dengan 104 saluran dan 26 pembangkit untuk tahun 2018 (sebelum masuknya PLTA Batang Toru 4 x 125 MW). Untuk tahun 2020 (saat masuknya PLTA Batang Toru) terdiri atas 74 bus dengan 108 saluran dan 33 pembangkit. Kondisi tersebut merupakan kondisi *peak* (beban puncak). Untuk kondisi *light* (beban dasar) tentunya memiliki nominal yang lebih kecil untuk pembangkit yang dioperasikan. (akan diperjelas di tabel data Pembangkit). Adapun pembangkit PLTGU Belawan dan PLTU Pangkalan Susu bertindak sebagai swing, dan pembangkit – pembangkit lainnya bertindak sebagai *voltage control*.

Untuk lebih jelasnya, sistem transmisi Sumatera Utara yang akan dibahas meliputi :

1. Sumatera Utara tahun 2018 (*peak*)
2. Sumatera Utara tahun 2018 (*light*)
3. Sumatera Utara tahun 2020 (*peak*)
4. Sumatera Utara tahun 2020 (*light*)

Berikut ini adalah data saluran, pembangkit, dan beban yang digunakan. Untuk Single Line Diagram akan dilampirkan

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Sumatera Utara

ID	From bus	To bus	R/km (Ω/km)	X/km (Ω/km)	Y/km (Ω/km)
Line4	RantauPrapat	P.Sidempuan	0,13275	0,41179	2,79986
Line5	RantauPrapat	G.Tua	0,13275	0,41179	2,79986
Line6	G.Tua	P.Sidempuan	0,13275	0,41179	2,79986
Line8	AEK Kanopan	RantauPrapat	0,13275	0,12985	8,98423
Line9	Kisaran	AEK Kanopan	0,13275	0,12985	8,98423
Line10	K.Tanjung	Kisaran	0,13275	0,12985	8,98423
Line13	T.Tinggi	K.Tanjung	0,03307	0,12985	8,98423
Line14	Perbaungan	Sei Rotan	0,03307	0,41179	2,79986
Line15	T.Tinggi	Sei Rotan	0,03307	0,41179	2,79986
Line16	T.Tinggi	Perbaungan	0,03307	0,41179	2,79986
Line17	T.Morawa	Denai	0,13275	0,41179	2,79986
Line18	Denai	Sei Rotan	0,13275	0,41179	2,79986
Line19	Sei Rotan	T.Morawa	0,13275	0,41179	2,79986
Line20	Sei Rotan	Belawan PLTGU	0,13275	0,12617	9,29561
Line23	Belawan PLTGU	Binjai	0,13275	0,12617	9,29561
Line24	P Brandan	Binjai	0,13275	0,12985	8,98423
Line27	Sei Rotan	PayaPasir	0,01881	0,12854	9,08372
Line29	Sei Rotan	TitiKuning	0,01881	0,12854	9,08372
Line30	Belawan PLTU	PayaPasir	0,03307	0,12744	9,26202
Line33	PayaPasir	Mabar	0,02807	0,12854	9,08372
Line34	PayaPasir	PayaGeli	0,02807	0,12854	9,08372
Line37	Binjai	PayaGeli	0,01856	0,12985	8,98423
Line39	Glugur	PayaGeli	0,02807	0,12854	9,08372
Line40	PayaGeli	TitiKuning	0,02807	0,40657	2,83744
Line41	TitiKuning	Namurambe	0,03307	0,40657	2,83744
Line42	Namurambe	PayaGeli	0,02807	0,40657	2,83744
Line44	GIS Listrik	TitiKuning	0,11275	0,12985	8,98423
Line45	TitiKuning	Brastagi	0,11275	0,12985	8,98423
Line47	P.Siantar	Porsea	0,11275	0,12985	8,98423
Line49	Porsea	Tarutung	0,03307	0,12985	8,98423

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Sumatera Utara (lanjutan)

ID	From bus	To bus	R/km (Ω /km)	X/km (Ω /km)	Y/km (Ω /km)
Line51	Sibolga	Tarutung	0,03307	0,12985	8,98423
Line53	P.Sidempuan	Sibolga	0,03307	0,12985	8,98423
Line55	DolokSanggul	Tarutung	0,03307	0,41179	2,79986
Line56	Tarutung	Tele	0,03307	0,41179	2,79986
Line57	Tele	Sidikalang	0,03307	0,41179	2,79986
Line58	Brastagi	Sidikalang	0,13275	0,41179	2,79986
Line59	Renun 2	Sidikalang	0,13275	0,41179	2,79986
Line60	Brastagi	Renun 2	0,13275	0,41179	2,79986
Line61	G.Para	P.Siantar	0,13275	0,12985	8,98423
Line62	T.Tinggi	G.Para	0,13275	0,12985	8,98423
Line64	Labuhan	Belawan PLTU	0,13275	0,41179	2,79986
Line65	Lamhotma	Labuhan	0,03307	0,41179	2,79986
Line69	Simangkok	Porsea	0,03307	0,12985	8,98423
Line73	LabuhanAngin	Sibolga	0,13275	0,12985	8,98423
Line76	Sipan 1	Sibolga	0,13275	0,41179	2,79986
Line77	Sipan 2	Sibolga	0,03307	0,41179	2,79986
Line78	Sipan 2	Sipan 1	0,03307	0,41179	2,79986
Line81	Lamhotma	Belawan PLTU	0,13275	0,41179	2,79986
Line85	Kualanamu	T.Morawa	0,13275	0,12985	8,98423
Line87	Sei Rotan	KIM	0,13275	0,39716	2,91799
Line89	P Brandan	PngklnSusu	0,13275	0,12985	8,98423
Line91	Bus434	Bus435	0,03307	0,12617	9,29561
Line93	Wampu	Brastagi	0,07575	0,12985	8,98423
Line95	Brastagi	Dairi	0,03307	0,41179	2,79986
Line97	Dairi	Kuta Cane (NAD)	0,01881	0,41179	2,79986
Line99	Kuta Cane (NAD)	Brastagi	0,03307	0,41179	2,79986
Line101	Salak	Sidikalang	0,13275	0,12985	8,98423
Line103	Sidikalang	DolokSanggul	0,13275	0,41179	2,79986
Line105	Parlilitan	DolokSanggul	0,13275	0,12985	8,98423
Line107	DolokSanggul	Pakkat	0,03307	0,12985	8,98423

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Sumatera Utara (lanjutan)

ID	From bus	To bus	R/km (Ω/km)	X/km (Ω/km)	Y/km (Ω/km)
Line109	Namurambe	Galang	0,13275	0,12617	9,29561
Line111	Bus449	Bus450	0,03307	0,18397	6,25264
Line113	Galang	NegeriDolok	0,03307	0,12617	9,29561
Line115	Galang	T.Morawa	0,01881	0,12617	9,29561
Line123	New P.Sidempuan	P.Sidempuan	0,01881	0,12985	8,98423
Line125	Penyabungan	New P.Sidempuan	0,01881	0,12985	8,98423
Line129	Tanah Jawa	P.Siantar	0,01881	0,12985	8,98423
Line131- 1	Simangkok	Asahan-3	0,03307	0,12985	8,98423
Line133- 1	Hasang-1	AEK Kanopan	0,03307	0,12985	8,98423
Line137	KIM	KIM II	0,03307	0,39716	2,91799
Line139	KIM II	Sei Rotan	0,03307	0,39716	2,91799
Line141	Pancing	KIM II	0,03307	0,12095	9,64036
Line143	SeiKera	Denai	0,07575	0,39716	2,91799
Line145	Pancing	SeiKera	0,07575	0,39716	2,91799
Line147	Pancing	Denai	0,01883	0,39716	2,91799
Line149	Perbaungan	Kualanamu	0,07575	0,12985	8,98423
Line151	LabuhanBilik	RantauPrapat	0,07575	0,12985	8,98423
Line153	PT.DPM	Sidikalang	0,07575	0,12985	8,98423
Line155	Sibuhuan	G.Tua	0,03307	0,12985	8,98423
Line157	Kisaran	TanjungBalai	0,03307	0,12985	8,98423
Line159	Perdagangan	K.Tanjung	0,03307	0,12985	8,98423
Line161	Perdagangan	Kisaran	0,03307	0,12985	8,98423
Line163	PayaGeli	Selayang	0,03307	0,12985	8,98423
Line164	Namurambe	Selayang	0,03307	0,12985	8,98423
Line166	BatuGinggaing	PayaGeli	0,03307	0,12985	8,98423
Line167	BatuGinggaing	GIS Listrik	0,03307	0,12985	8,98423
Line169	KIM	Mabar	0,03307	0,12854	9,08372
Line171	SeiKera	Teladan	0,03307	0,12854	9,08372
Line173	Teladan	TitiKuning	0,03307	0,12854	9,08372
Line175	PayaGeli	Helvetia	0,02807	0,12854	9,08372

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Sumatera Utara (lanjutan)

ID	From bus	To bus	R/km (Ω /km)	X/km (Ω /km)	Y/km (Ω /km)
Line177	Glugur	Helvetia	0,02807	0,12854	9,08372
Line179	Bus500	Bus498	0,02807	0,18394	6,25338
Line181	Tele	Pangururan	0,02807	0,12985	8,98423
Line183	Binjai	Kuala	0,02807	0,12985	8,98423
Line185	P Brandan	TanjungPura	0,0375	0,12985	8,98423
Line187	Binjai	TanjungPura	0,03307	0,12985	8,98423
Line189	P.Sidempuan	Martabe	0,03307	0,12985	8,98423
Line191	Sibolga	Martabe	0,03307	0,12985	8,98423
Line193	Natal	Penyabungan	0,03307	0,12985	8,98423
Line196	Sigundong	Tarutung	0,03307	0,12985	8,98423
Line203	Sei Rotan	Belawan PLTGU.	0,03307	0,3942	2,92601
Line204	RantauPrapat	Kota Pinang.	0,01881	0,12985	8,98423
Line 206	Bus 638	Bus 637	0,01881	0,3942	2,92601
Line 208	Batu Ginging	Paya Geli	0,07501	0,40827	2,82286
Line177	Glugur	Helvetia	0,02807	0,12854	9,08372
Line179	Bus500	Bus498	0,02807	0,18394	6,25338
Line181	Tele	Pangururan	0,02807	0,12985	8,98423
Line183	Binjai	Kuala	0,02807	0,12985	8,98423
Line185	P Brandan	TanjungPura	0,0375	0,12985	8,98423
Line187	Binjai	TanjungPura	0,03307	0,12985	8,98423
Line189	P.Sidempuan	Martabe	0,03307	0,12985	8,98423
Line191	Sibolga	Martabe	0,03307	0,12985	8,98423
Line193	Natal	Penyabungan	0,03307	0,12985	8,98423
Line196	Sigundong	Tarutung	0,03307	0,12985	8,98423
Line203	Sei Rotan	Belawan PLTGU.	0,03307	0,3942	2,92601
Line204	RantauPrapat	Kota Pinang.	0,01881	0,12985	8,98423
Line 206	Bus 638	Bus 637	0,01881	0,3942	2,92601
Line 208	Batu Ginging	Paya Geli	0,07501	0,40827	2,82286

Tabel 3.2 Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2018

NO	NAMA PEMBANGKIT	Peak		Light	
		Daya Rating (MW)	Daya Operate (MW)	MW	Daya Operate (MW)
1	PLTGU Belawan 1	150	55,54		
2	PLTGU Belawan 2	150	55,54		
3	PLTGU Belawan 3	150	55,54		
4	PLTGU Belawan 4	150	145		
5	PLTGU Belawan 5	150	55,54		
6	PLTGU Belawan 6	150	5,554		
7	PLTU Belawan 1	55	50		
8	PLTU Belawan 2	55	50		
9	PLTU Belawan 3	55	50		
10	PLTU Belawan 4	55	50		
11	PLTA ASAHAN 3-1	174	140	174	140
12	PLTA ASAHAN 1-1	90	80	90	80
13	PLTA ASAHAN 121	90	80	90	80
14	PLTA Hasang 1	40	30	40	30
15	PLTA Inalium	90	85	90	85
16	PLTA Renun 1	41	40	41	40
17	PLTA Renun 2	41	40	41	40
18	PLTA Sipan 1	33	30	35	30
19	PLTA Sipan 2	17	30	35	30
20	PLTA Wampu	45	26	33	26
21	PLTG Paya Pasir	26,5	14	26,5	14
22	PLTU P Susu 1-1			220	35
23	PLTU P Susu 1-2			220	20
24	PLTU P Susu 2-1			220	206,642
25	PLTU Labuhan Angin	115	100		
26	PLTU Sumut a-1	150	120		
27	PLTU Sumut a-2	150	120		
28	Sumbagteng 2	100	40	100	30
29	Sumbagteng 3	800	450	800	356

Tabel 3.3 Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2020

NO	NAMA PEMBANGKIT	Peak 2020		Light 2020	
		(MW)	operate (MW)	(MW)	operate (MW)
1	PLTGU Belawan 1	150	5,554	150	21,679
2	PLTGU Belawan 2	150	5,554	150	21,679
3	PLTGU Belawan 3	150	5,554	150	21,679
4	PLTGU Belawan 4	150	145	150	100
5	PLTGU Belawan 5	150	5,554	150	21,679
6	PLTGU Belawan 6	150	5,554	150	21,679
7	PLTU belawan 1	55	50	55	50
8	PLTU Belawan 2	55	50		
9	PLTA ASAHAN 3-1	174	140	174	140
10	PLTA ASAHAN 1-1	90	80	90	80
11	PLTA ASAHAN 1-2	90	80	90	80
12	PLTA Batang Toru 2-1	125	120	125	120
13	PLTA Batang Toru 3-1	125	120	125	120
14	PLTA Batang Toru 4-1	125	120	125	120
15	PLTA Batang Toru 5-1	125	120	125	120
16	PLTA Hasang 1	40	30	40	30
17	PLTA Inalium	90	85	90	85
18	PLTA Renum 1	41	40	41	38
19	PLTA Renum 2	41	40	41	38
20	PLTA Segundong 1	35	30	35	30
21	PLTA Segundong 2	35	30	35	30
22	PLTA Sipan 1	33	26	33	26
23	PLTA Sipan 2	17	14	17	14
24	PLTA Wampu	45	35	45	35
25	PLTG Paya Pasir	26,5	20	26,5	20
26	PLTU Labuhan Angin	115	100	115	100
27	PLTU Pangkalan Susu 1-1	220	91,423		
28	PLTU Pangkalan Susu 1-2	220	91,423		
29	PLTU Pangkalan Susu 2-1	220	91,423		
30	PLTU Sumut a-1	150	120		

Tabel 3.3 Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2020 (lanjutan)

NO	NAMA PEMBANGKIT	Peak 2020		Light 2020	
		(MW)	operate (MW)	(MW)	operate (MW)
31	PLTU Sumut a-2	150	120		
32	Sumbagteng 2	100	80	100	48
33	Sumbagteng 3	800	882	800	529

Tabel 3.4 Daftar Beban Sumatera Utara 2018

No.	Load	Light 2018		Peak 2018	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	Lump4	12.15	5.885	13.50	6.538
2	Lump5	12.15	5.885	13.50	6.538
3	Lump6	17.28	8.369	21.42	10.376
4	Lump7	17.28	8.369	21.42	10.376
5	Lump8	26.46	12.815	26.69	12.928
6	Lump9	26.46	12.815	31.97	15.483
7	Lump10	26.46	12.815	31.97	15.483
8	Lump11	14.58	7.061	24.07	11.66
9	Lump12	10.8	5.231	17.66	8.552
10	Lump13	10.8	5.231	17.66	8.552
11	Lump14	28.08	13.599	31.93	15.466
12	Lump15	28.08	13.599	31.93	15.466
13	Lump16	23.76	11.507	32.21	15.6
14	Lump17	25.92	12.553	32.26	15.626
15	Lump20	21.06	10.199	35.03	16.964
16	Lump21	19.98	9.677	32.92	15.944
17	Lump22	24.3	11.769	31.97	15.485
18	Lump23	16.2	7.846	27.00	13.077
19	Lump24	6.48	3.138	10.53	5.1
20	Lump25	12.96	6.277	21.06	10.2
21	Lump26	15.12	7.323	25.38	12.292

Tabel 3.4 Daftar Beban Sumatera Utara 2018 (lanjutan)

No.	Load	Light 2018		Peak 2018	
		MW	MVAR	MW	MVAR
22	Lump27	15.12	7.323	25.38	12.292
23	Lump28	11.34	5.492	18.36	8.892
24	Lump29	10.8	5.231	18.36	8.892
25	Lump30	9.18	4.446	15.12	7.323
26	Lump32	10.8	5.231	13.50	6.538
27	Lump33	5.94	2.877	9.99	4.838
28	Lump34-1	21.06	10.199	35.10	16.999
29	Lump36	29.16	14.122	32.40	15.692
30	Lump37	29.16	14.122	32.40	15.692
31	Lump38	29.16	14.122	32.40	15.692
32	Lump39	6.24	4.68	10.40	7.8
33	Lump43	10.8	5.231	17.82	8.631
34	Lump45	5.954	2.883	9.92	4.806
35	Lump48	16.2	7.846	27.00	13.077
36	Lump50	24.3	11.769	32.40	15.692
37	Lump51	2.25	1.09	3.78	1.831
38	Lump52	13.5	6.538	22.68	10.984
39	Lump57	15.12	7.323	16.20	7.846
40	Lump58	7.938	3.845	8.51	4.119
41	Lump68	15.12	7.323	16.20	7.846
42	Lump70	17.82	8.631	29.70	14.384
43	Lump71	8.91	4.315	14.85	7.192
44	Lump72	6.48	3.138	10.80	5.231
45	Lump73	2.16	1.046	3.60	1.744
46	Lump74	0.54	0.262	0.90	0.436
47	Lump75	19.98	9.677	33.48	16.215
48	Lump77	3.33	1.613	5.58	2.703
49	Lump79	1.98	0.959	3.33	1.613

Tabel 3.4 Daftar Beban Sumatera Utara 2018 (lanjutan)

No.	Load	Light 2018		Peak 2018	
		MW	MVAR	MW	MVAR
50	Lump81	7.29	3.531	12.15	5.885
51	Lump82	7.655	3.707	12.76	6.179
52	Lump83	14.58	7.061	24.30	11.769
53	Lump85-1	13.892	6.728	22.96	11.122
54	Lump86	26.46	12.815	43.74	21.184
55	Lump88	11.34	5.492	18.90	9.154
56	Lump90	6.75	3.269	11.07	5.361
57	Lump91	13.5	6.538	22.14	10.723
58	Lump94	15.66	7.584	21.60	10.461
59	Lump95	15.66	7.584	21.60	10.461
60	Lump98	27.54	13.338	21.60	10.461
61	Lump99	27.54	13.338	21.60	10.461
62	Lump103	0.96	0.72	1.68	1.26
63	Lump105	0.27	0.131	0.54	0.262
64	Lump106	1.62	0.785	2.16	1.046
65	Lump107	2.43	1.177	3.78	1.831
66	Lump109	25.38	12.292	42.12	20.4
67	Lump111	4.05	1.962	6.75	3.269
68	Lump112	9.72	4.708	16.20	7.846
69	Lump113	18.72	9.067	30.96	14.995
70	Lump116	18.72	9.067	30.96	14.995
71	Lump117	22.32	10.81	37.44	18.133
72	Lump118	22.32	10.81	37.44	18.133
73	Lump121	41.25	19.972	60.00	29.052
74	Lump122	41.25	19.977	60.00	29.058
75	Lump123	28.62	13.861	43.20	20.923
76	Lump124	28.62	13.861	43.20	20.923
77	Lump126	6.48	3.138	10.80	5.231

Tabel 3.4 Daftar Beban Sumatera Utara 2018 (lanjutan)

No.	Load	Light 2018		Peak 2018	
		MW	MVAR	MW	MVAR
78	Lump127	17.28	8.369	28.62	13.861
79	Lump130	17.28	8.369	28.62	13.861
80	Lump132	2.7	1.308	4.32	2.092
81	Lump135	4.59	2.223	7.56	3.661
82	Lump137	4.32	2.092	7.29	3.531
83	Lump138	4.32	2.092	7.29	3.531
84	Lump139	14.4	6.974	23.76	11.507
85	Lump140	14.4	6.974	23.76	11.507
86	Lump142	23.04	11.158	38.16	18.482
87	Lump143	23.04	11.158	38.16	18.482
88	Lump144	3.24	1.569	5.13	2.485
89	Lump146	3.24	1.569	5.13	2.485
90	Lump148	3.06	1.482	5.13	2.485
91	Lump150	3.06	1.482	5.13	2.485
92	Lump152	7.29	3.531	11.88	5.754
93	Lump154	7.02	3.4	11.88	5.754
94	Lump155	5.04	2.441	8.64	4.185
95	Lump157	5.04	2.441	21.60	10.461
96	Lump160-1	23.321	14.453	46.69	28.936
97	Lump161	27.54	13.338	43.20	20.923
98	Lump161-1	23.321	14.453	53.23	32.992
99	Lump163	5.67	2.746	13.50	6.538
100	Lump163-1	24.3	11.769	39.96	19.354
101	Lump163-3	79.2	38.358	108.00	52.307
102	Lump165	14.58	7.061	24.30	11.769
103	Lump167	2.25	1.09	3.78	1.831
104	Lump169	13.5	6.538	22.14	10.723

Tabel 3.5 Daftar Beban Sumatera Utara 2020

No.	Load	Light 2020		Peak 2020	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	Lump4	12.798	6.198	21.33	10.331
2	Lump5	12.798	6.198	21.33	10.331
3	Lump6	20.412	9.886	34.02	16.477
4	Lump7	20.412	9.886	34.02	16.477
5	Lump8	32.076	15.535	37.8	18.307
6	Lump9	32.076	15.535	37.8	18.307
7	Lump10	32.076	15.535	37.8	18.307
8	Lump11	18.792	9.101	31.32	15.169
9	Lump12	13.608	6.591	22.68	10.984
10	Lump13	13.608	6.591	22.68	10.984
11	Lump14	35.64	17.261	37.8	18.307
12	Lump15	35.64	17.261	37.8	18.307
13	Lump16	30.132	14.593	37.8	18.307
14	Lump17	32.4	15.692	43.2	20.923
15	Lump20	26.892	13.024	44.82	21.707
16	Lump21	25.272	12.239	42.12	0.0204
17	Lump22	20.736	10.042	34.56	16.738
18	Lump23	20.736	10.042	34.56	16.738
19	Lump24	7.614	3.688	12.69	6.146
20	Lump25	15.228	7.375	25.38	12.292
21	Lump26	19.116	9.258	31.86	15.431
22	Lump27	19.116	9.258	31.86	15.431
23	Lump28	12.636	6.12	21.06	0.0102
24	Lump29	12.636	6.12	21.06	0.0102
25	Lump30	10.044	4.865	16.74	8.108
26	Lump32	12.635	6.121	16	7.751
27	Lump33	6.804	3.295	11.34	5.492

Tabel 3.5 Daftar Beban Sumatera Utara 2020 (lanjutan)

No.	Load	Light 2020		Peak 2020	
		MW	MVAR	MW	MVAR
28	Lump34-1	25.272	12.239	42.12	20.399
29	Lump36	19.764	9.572	32.94	15.954
30	Lump37	19.44	9.415	32.4	15.692
31	Lump38	19.44	9.415	32.4	15.692
32	Lump39	7.668	3.714	12.78	0.00619
33	Lump43	13.608	6.591	22.68	10.984
34	Lump45	7.182	3.478	11.907	5.767
35	Lump48	20.736	10.042	34.56	16.738
36	Lump50	20.736	10.042	34.56	16.738
37	Lump51	2.592	1.255	4.32	2.092
38	Lump52	15.228	7.375	25.38	12.292
39	Lump57	19.44	9.415	32.4	15.692
40	Lump58	10.26	4.969	17.01	8.238
41	Lump68	19.44	9.415	32.4	15.692
42	Lump70	19.44	9.415	32.4	15.692
43	Lump71	9.72	4.708	16.2	7.846
44	Lump72	7.128	3.452	11.88	5.754
45	Lump73	2.376	1.151	3.96	1.918
46	Lump74	0.54	0.262	0.9	0.000436
47	Lump75	21.708	10.513	36.18	17.523
48	Lump77	3.618	1.752	6.03	0.00292
49	Lump79	2.214	1.072	3.69	1.787
50	Lump81	8.1	3.923	13.5	6.538
51	Lump82	8.55	4.141	14,175	6.865
52	Lump83	16.524	8.003	27.54	13.338
53	Lump85-1	16.416	7.951	22.68	10.984
54	Lump86	31.104	15.064	37.8	18.307

Tabel 3.5 Daftar Beban Sumatera Utara 2020 (lanjutan)

No.	Load	Light 2020		Peak 2020	
		MW	MVAR	MW	MVAR
55	Lump88	13.608	6.591	22.68	10.984
56	Lump90	8.586	4.158	14.31	6.931
57	Lump91	17.172	8.317	28.62	13.861
58	Lump94	19.926	9.651	21.6	10.461
59	Lump95	19.928	9.646	21	10.164
60	Lump98	33.372	16.162	32.4	15.692
61	Lump99	33.372	16.162	32.4	15.692
62	Lump103	1.458	0.706	2.43	1.177
63	Lump105	0.324	0.157	0.54	0.000262
64	Lump106	1.296	0.628	2.16	1.046
65	Lump107	2.268	1.098	3.78	1.831
66	Lump109	27.864	13.495	46.44	22.492
67	Lump111	4.374	2.118	7.29	3.531
68	Lump112	10.692	5.178	17.82	8.631
69	Lump113	23.328	11.298	38.88	1.883
70	Lump116	23.76	11.507	39.6	19.179
71	Lump117	28.512	13.808	47.52	23.015
72	Lump118	28.512	13.808	47.52	23.015
73	Lump121	47.954	23.22	57,602	27.893
74	Lump122	47.952	23.223	57,601	27.896
75	Lump123	33.048	16.005	43.2	20.923
76	Lump124	33.048	16.005	48.6	23.538
77	Lump126	7.29	3.531	12.15	5.885
78	Lump127	20.088	9.729	33.48	16.215
79	Lump130	20.088	9.729	33.48	16.215
80	Lump132	2.592	1.255	4.32	2.092
81	Lump135	4.86	2.354	8.1	3.923

Tabel 3.5 Daftar Beban Sumatera Utara 2020 (lanjutan)

No.	Load	Light 2020		Peak 2020	
		MW	MVAR	MW	MVAR
82	Lump137	5.022	2.432	8.37	4.054
83	Lump138	5.022	2.432	8.37	4.054
84	Lump139	18.144	8.788	30.24	14.646
85	Lump140	17.712	8.578	29.52	14.297
86	Lump142	29.808	14.436	49.68	24.061
87	Lump143	29.808	14.436	49.68	24.061
88	Lump144	3.564	1.726	5.94	2.877
89	Lump146	3.564	1.726	5.94	2.877
90	Lump148	3.456	1.674	5.76	0.279
91	Lump150	3.456	1.674	5.76	0.279
92	Lump152	8.1	3.923	13.5	6.538
93	Lump154	8.1	3.923	13.5	6.538
94	Lump155	43.2	20.922	64.8	31.384
95	Lump157	43.2	20.922	64.8	31.384
96	Lump160-1	32.832	15.901	54.72	26.502
97	Lump161	33.372	16.162	32.4	15.692
98	Lump161-1	32.832	15.901	43.2	20.923
99	Lump163	6.804	3.295	11.34	5.492
100	Lump163-1	32.076	15.535	32.4	15.692
101	Lump163-3	120.528	58.374	151.2	0.7323
102	Lump165	18.792	9.101	31.32	15.169
103	Lump167	2.592	1.255	4.32	2.092
104	Lump169	16.848	8.16	28.08	0.136

3.2 Data Kontrol Generator

Pemodelan dinamis (stabilitas transien) dari sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV – 275 kV dapat di lihat pada tabel 3.6. Pemodelan ini termasuk model dinamis komponen kontrol sistem tenaga listrik yaitu exciter dan governor yang direpresentasikan sesuai standar industri untuk software stabilitas transien.

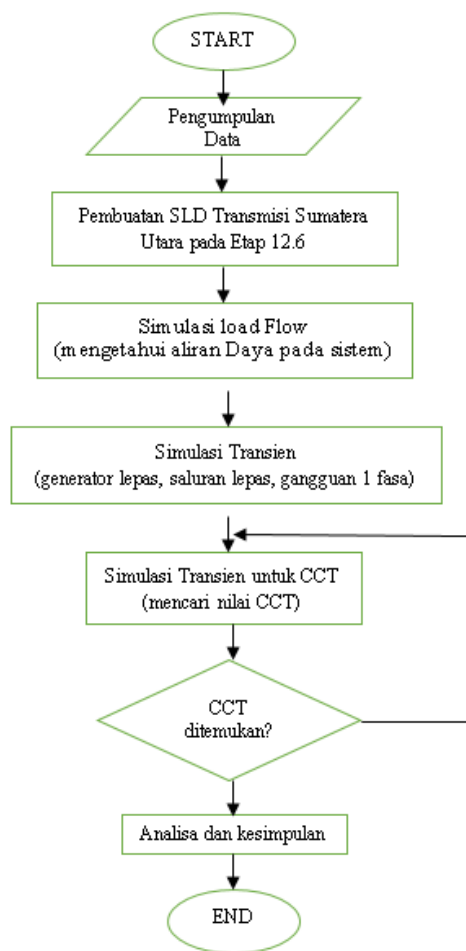
Nilai parameter yang di inputkan untuk data governor atau exciter pada generator mengikuti nilai sample data dari software Etap 12.6 dengan asumsi bahwa nilai tersebut adalah nilai terbaik untuk memperbaiki respon tegangan dan frekuensi setelah terjadinya gangguan.

Tabel 3.6 Pemodelan dinamis untuk unit generator pada sistem Sumatera Utara 150 – 275 kV

MODEL	STANDARD	DESKRIPSI	LOKASI PEMBANGKIT
Exciter			
ETAP-12.6 model	IEEE	IEEE AC1A dan AC5A	Semua unit generator sistem Sumatera Utara
Governor			
ETAP-12.6 model	Industry	General Purpose Governor-Turbine system	Semua unit PLTA sistem Sumatera Utara
ETAP-12.6 model	IEEE	IEEE Gas-Turbine	Semua unit PLTG dan PLTGU sistem Sumatera Utara
ETAP-12.6 model	IEEE	General Steam-Turbine representation	Semua unit PLTU sistem Sumatera Utara

3.3 Metodologi Simulasi

Sebelum tahap simulasi dan analisa, diperlukan suatu metodologi tentang apa saja yang diperlukan untuk simulasi dan hasil simulasi seperti apa yang diinginkan. Metodologi yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu.



Gambar 3.2 Flow chart metodologi

Berdasarkan gambar 3.2 di atas maka metodologi simulasi yang digunakan dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan data-data yang dari sistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV – 275 kV. Data-data meliputi data

pembangkitan, data beban, dan data saluran dari masing-masing bus. Kemudian dilakukan studi aliran daya (*load flow analysis*) dengan ETAP 12.6.0 saat keadaan awal untuk mengetahui apakah sistem dalam kondisi normal atau tidak.

2. Simulasi Transien

Setelah menentukan studi kasus untuk analisis transien maka dilakukan simulasi sistem saat mengalami gangguan transien. Gangguan transien yang disimulasikan ada tiga yakni pelepasan generator, pelepasan saluran, dan gangguan hubung singkat.

3. Analisis Transien

Dari hasil simulasi transien akan dianalisis respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor akibat gangguan transien. Perubahan dari respon tegangan, frekuensi dan sudut rotor juga akan diamati dalam selang waktu yang ditentukan, apakah sistem kembali stabil atau tidak berdasarkan standar yang dijadikan acuan. Khusus untuk gangguan hubung singkat apabila sistem dikatakan tidak stabil akan dilakukan penambahan waktu untuk trip CB sampai waktu stabil sistem atau dinamakan juga CCT.

4. Penarikan Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai kondisi kestabilan sistem akibat gangguan transien di Sumatera Utara sebelum masuknya PLTA Batang Toru 4 x 125 MW dan setelah masuknya PLTA Batang Toru 4 x 125 MW tahun 2020.

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan Sumatera Utara.

Pemodelan sistem Kelistrikan Sumatera Utara dilakukan dengan cara membuat *single line diagram* pada *software* simulasi ETAP 12.6. selanjutnya akan dilakukan simulasi stabilitas transien yang meliputi lepasnya Generator, lepasnya single line dari double line, lepasnya double line, gangguan satu fasa dan lepasnya single line dari double line dengan kembalinya recloser, dan gangguan hubung singkat untuk menentukan nilai *Critical Clearing Time (CCT)* .

Pada simulasi ini akan dianalisa respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan hasil simulasi. Titik yang di plot untuk setiap kasus berbeda sesuai dengan kebutuhan. Data pembangkitan dan beban ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 4.1 Summary of Total Generation, Demand

Sumatera Utara	2018		2020	
	MW (Peak)	MW (Light)	MW (Peak)	MW (Light)
Swing Bus(es) :	646,5	206,6	302,03	108,39
Source (Non-Swing Bus) :	1756	1416	2677	1953
Total Demand :	2402,57	1622,64	2979,08	2061,39

Studi ini menganalisa stabilitas sistem setelah penambahan PLTA Batang Toru 4 x 125 MW. Adapun kasus yang di analisis adalah :

1. *No-Fault Tripping of The Largest On-Line Generating Unit*

Pada kasus ini, dilakukan pemadaman pada generator terbesar pada saat terhubung pada sistem Sumatera Utara. Generator dengan kapasitas terbesar akan off sedangkan generator pembangkit lain aktif.

2. ***No-Fault One-Circuit Tripping of the Double-Circuit Interconnection Transmission Line***

Pada kasus ini satu saluran dari saluran ganda yang memiliki aliran daya terbesar lepas (kehilangan transfer daya) tanpa gangguan.

3. ***No-Fault Double-Circuit Tripping of Interconnection Transmission Line***

Pada kasus ini saluran ganda yang memiliki aliran daya terbesar lepas (kehilangan transfer daya) tanpa gangguan.

4. ***Single Pole Auto Reclosing***

Pada kasus ini terjadi hubung singkat 1 fasa ke tanah di bus. Kemudian diikuti oleh lepasnya satu saluran (*one circuit*) dari saluran ganda. setelah itu satu saluran yang lepas kembali lagi ke saluran ganda.

5. ***Critical Clearing Time (CCT)***

Pada kasus ini terjadi hubung singkat 3 fasa di bus kemudian dicari waktu pemutusan kritisnya dengan membuka nya CB pada saluran bus tersebut

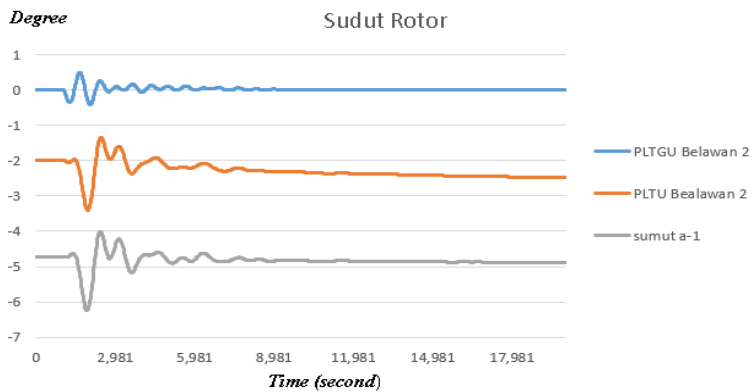
Dari setiap kasus di atas, akan diambil satu kasus pada tahun 2018 dan 2020 untuk beban puncak (*peak load*) dan beban dasar (*light load*).

4.2 Hasil Simulasi Stabilitas Transien

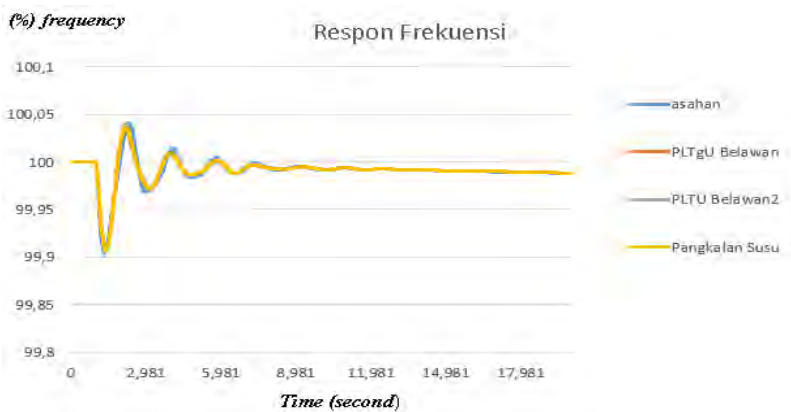
4.2.1 *No-Fault Tripping of The Largest On-Line Generating Unit (Generator Lepas)*

a) Tahun 2018 (beban puncak)

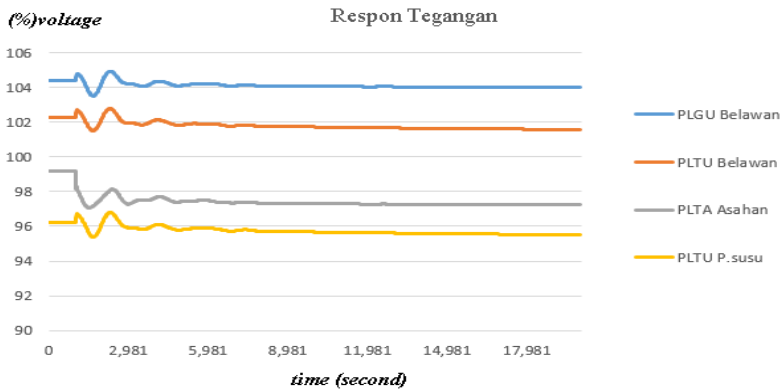
Pada kasus ini, PLTA Asahan 3-1 yang memiliki kapasitas 174 MW dan dioperasikan sebesar 140 MW sebagai voltage control akan trip. Daya keseluruhan kapasitas pembangkit adalah 3122,5 MW dan kebutuhan beban sebesar 2402,57 MW. Hasil simulasi ketika PLTA Asahan 3-1 trip sebagai berikut :



Gambar 4.1 Respon sudut Rotor Generator ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – peak load) trip



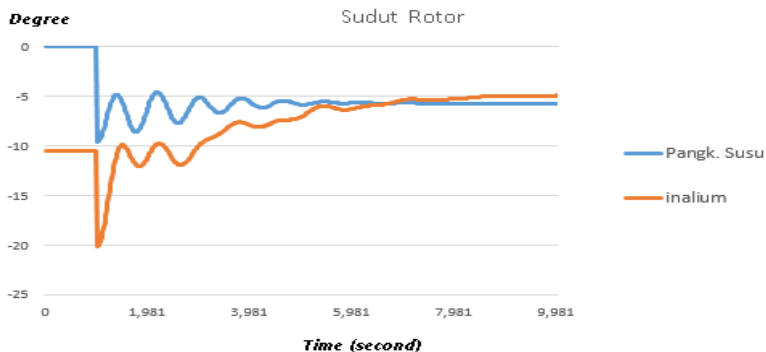
Gambar 4.2 Respon frekuensi pada bus ketika PLTA Asahan 3-1(2018 – peak load) trip



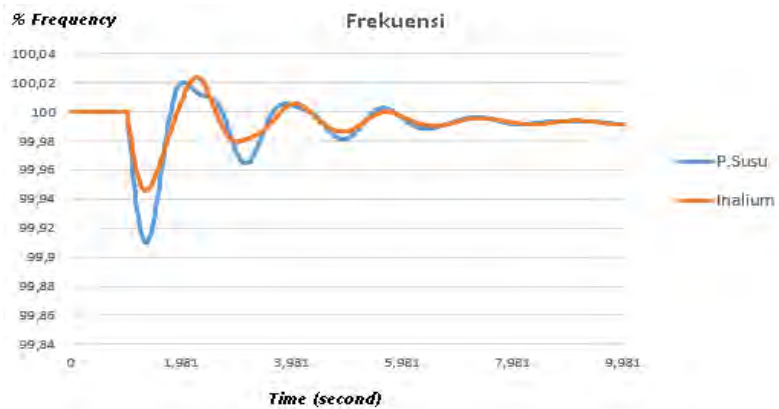
Gambar 4.3 Respon tegangan pada bus ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – *peak load*) trip

b) Tahun 2018 (beban dasar)

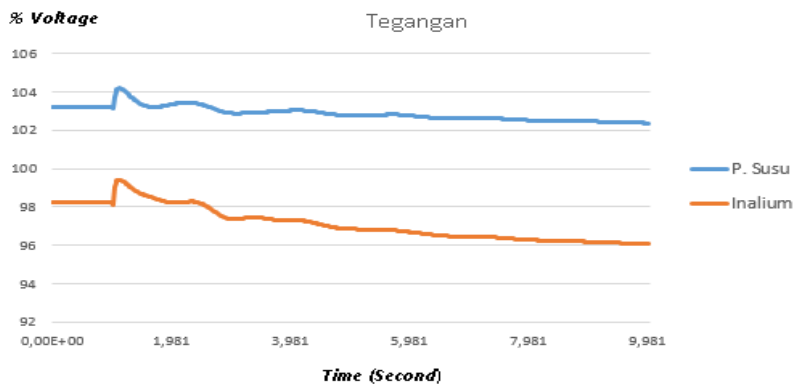
Pada kasus ini, PLTA Asahan 3-1 yang memiliki kapasitas 174 MW dan dioperasikan sebesar 140 MW sebagai voltage control akan trip. Daya keseluruhan kapasitas prmbangkit adalah 2297,5 MW dan kebutuhan beban sebesar 1622,64 MW. Hasil simulasi ketika PLTA Asahan 3-1 trip sebagai berikut :



Gambar 4.4 Respon sudut Rotor Generator ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – *light load*) trip



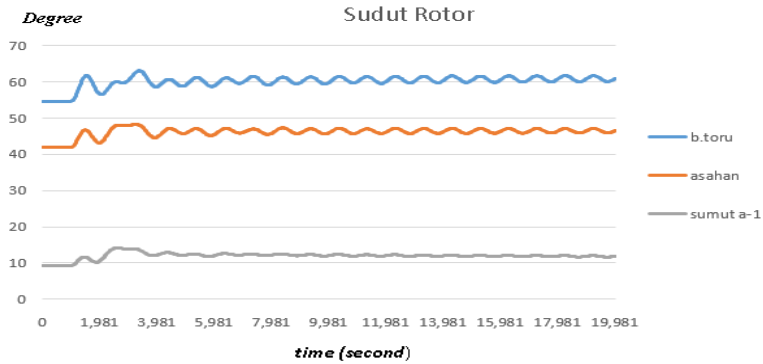
Gambar 4.5 Respon frekuensi pada bus ketika PLTA Asahan 3-1(2018 – *light load*) trip



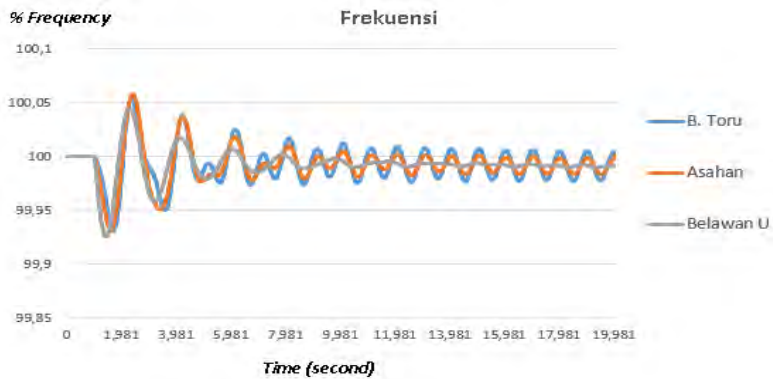
Gambar 4.6 Respon tegangan pada bus ketika PLTA Asahan 3-1 (2018 – *light load*) trip

c) Tahun 2020 (beban puncak)

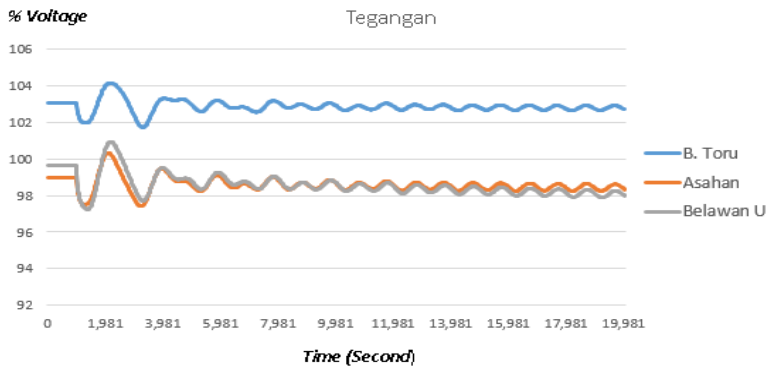
Pada kasus ini, PLTU Pangkalan Susu 1-1 yang memiliki kapasitas 220 MW dan dioperasikan sebesar 91,44 MW sebagai generator swing akan trip. Daya keseluruhan kapasitas pembangkit adalah 4422,5 MW dan kebutuhan beban sebesar 2979 MW. Hasil simulasi ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1 trip sebagai berikut :



Gambar 4.7 Respon sudut Rotor Generator ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1 (2020 – *peak load*) trip



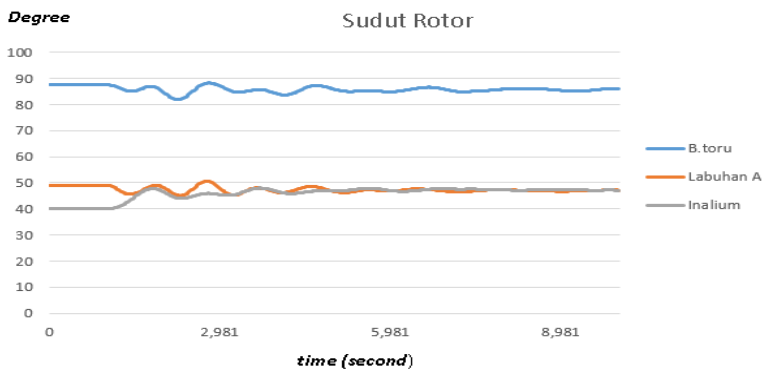
Gambar 4.8 Respon frekuensi pada bus ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1(2020 – *peak load*) trip



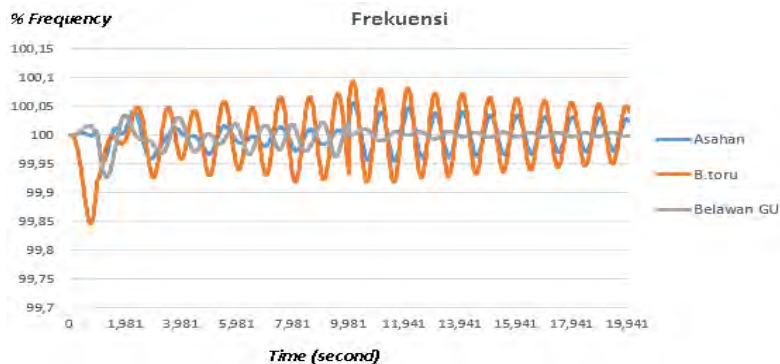
Gambar 4.9 Respon tegangan pada bus ketika PLTU Pangkalan Susu 1-1 (2020 – *peak load*) trip

d) Tahun 2020 (beban dasar)

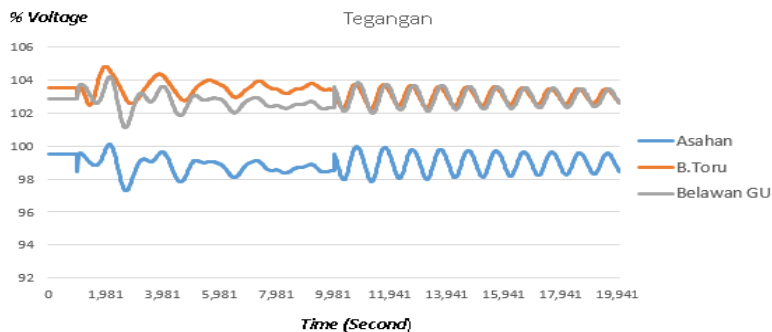
Pada kasus ini, PLTA Asahan 3-1 yang memiliki kapasitas 220 MW dan dioperasikan sebesar 140 MW sebagai generator voltage control akan trip. Daya keseluruhan kapasitas pembangkit adalah 3427,5 MW dan kebutuhan beban sebesar 2061 MW. Hasil simulasi ketika PLTA Asahan 3-1 trip sebagai berikut :



Gambar 4.10 Respon sudut Rotor Generator ketika PLTA Asahan 3-1 (2020 – *light load*) trip



Gambar 4.11 Respon frekuensi pada bus ketika PLTA Asahan 3-1(2020 – *light load*) trip



Gambar 4.12 Respon tegangan pada bus ketika PLTA Asahan 3 -1 (2020 – *light load*) trip

Dari hasil simulasi generator lepas pada setiap sistem tahun 2018 dan 2020 beban puncak dan beban dasar masih berada pada batas stabil. Pada tahun 2018 *peak load* dan *light load*, PLTA Asahan beroperasi paling besar dari pada generator lainnya. Dengan hilangnya PLTA Asahan 3-1 maka sistem kehilangan sebesar 5,8% daya *supply* dari sistem 2018 beban puncak, dan 8,6% daya *supply* dari sistem 2018 beban dasar. Pada respon sudut rotor terjadi osilasi terbesar di sistem 2020 beban dasar dapat dilihat pada gambar 4.10 yaitu pada PLTA Batang Toru 1 mencapai 87 *degree*. Pada sstem 2020 beban puncak sudut rotor pada PLTA Batang Toru 1 juga mengalami osilasi yang

besar yaitu 62,4 *degree* (pada gambar 4.7). Namun selama masih bisa kembali steady state di bawah 90 *degree* maka masih dalam batas stabil. Perubahan sudut rotor inidapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Salah satu di antaranya pembebanan generator, inersia, dan damping dari masing – masing generator. Geerator yang memiliki damping yang besar akan cenderung lebih stabil jika terjadi gangguan dan sebaliknya.

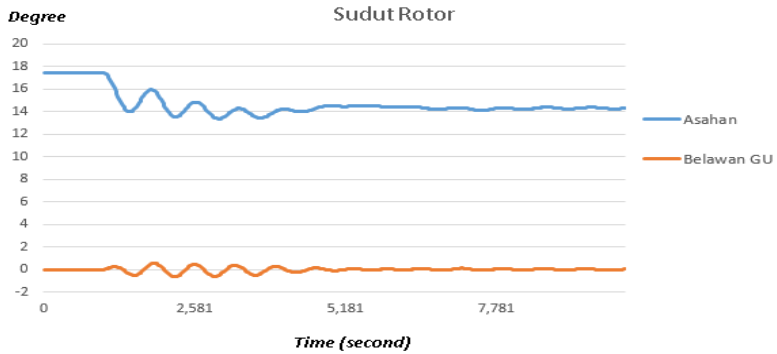
Pada respon tegangan dan frekuensi, beberapa bus pada sistem tahun 2018 dan 2020 ketika PLTA Asahan 3-1 lepas tidk mengalami osilasi yang sampai keluar dari batas stabil. Di mana untuk tegangan pada sistem 150 kV adalah +5% dan -10%. Sedangkan untuk frekuensi batas stabilnya adalah +100,83% dan -99,17%.

4.2.2 *No-Fault One-Circuit Tripping of the Double-Circuit Interconnection Transmission Line* (satu saluran dari saluran ganda lepas)

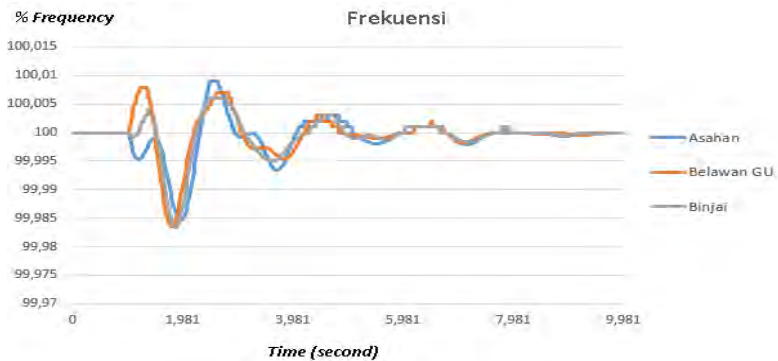
a) Tahun 2018 (beban puncak)

Pada kasus ini diperlukan simulasi load flow terlebih dahulu untuk mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir di saluran transmisi.

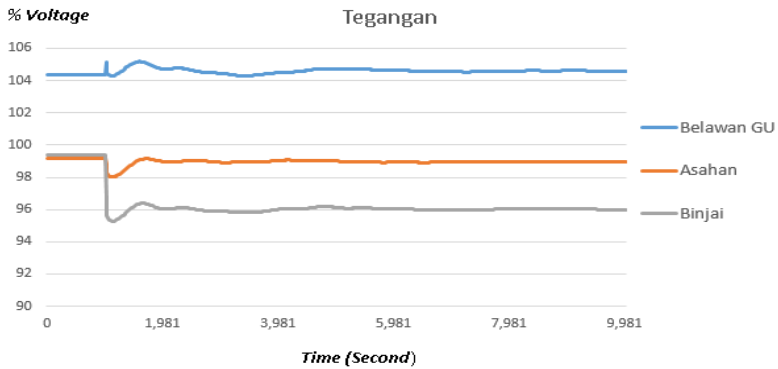
Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2018 untuk kasus beban puncak berada di saluran 23 yaitu antara bus **PLTGU Belawan – bus Binjai** sebesar 400,6 MW. Pada simulasi transien ini satu saluran dari saluran ganda leas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.13 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 23 lepas (2018 – *peak load*)



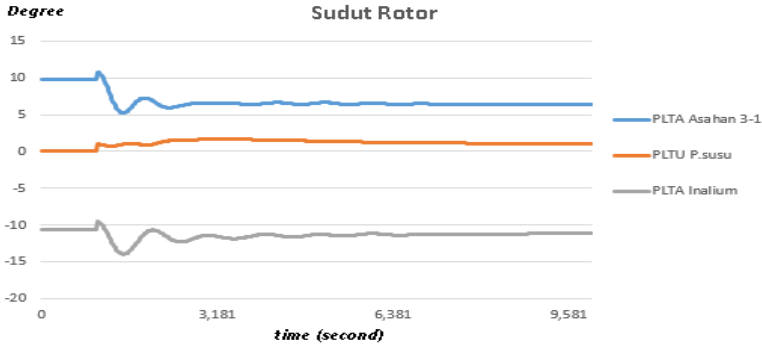
Gambar 4.14 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 23 lepas (2018 – *peak load*)



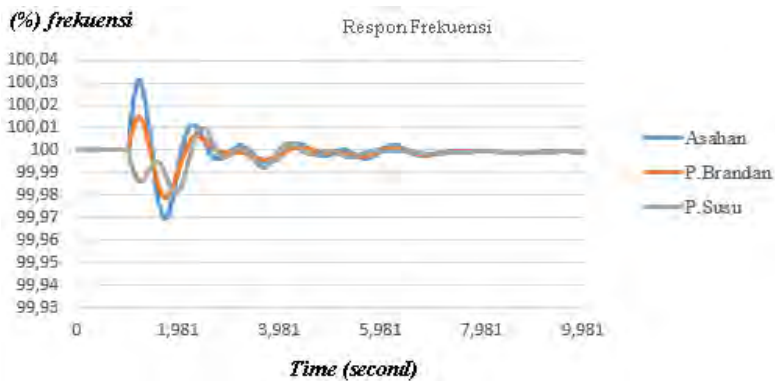
Gambar 4.15 Respon tegangan pada bus ketika saluran 23 lepas (2018 – peak load)

b) Tahun 2018 (beban dasar)

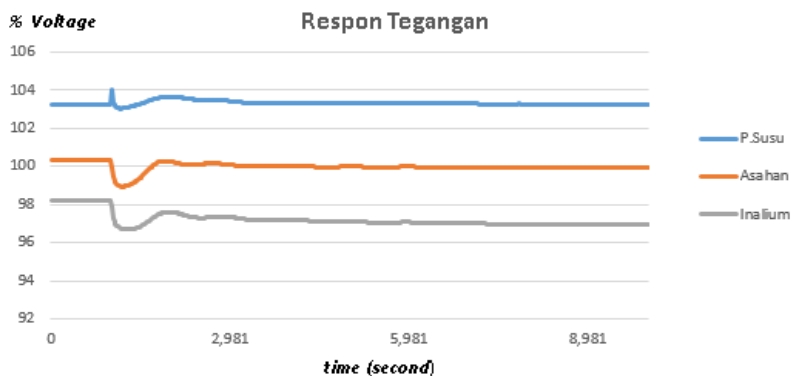
Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2018 untuk kasus beban dasar berada di saluran 89 yaitu antara bus **P. Brandon – bus Pangkalan Susu** sebesar 473,05 MW. Pada simulasi transien ini satu saluran dari saluran ganda lepas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut :



Gambar 4.16 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 89 lepas (2018 – light load)



Gambar 4.17 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 89 lepas (2018 – light load)

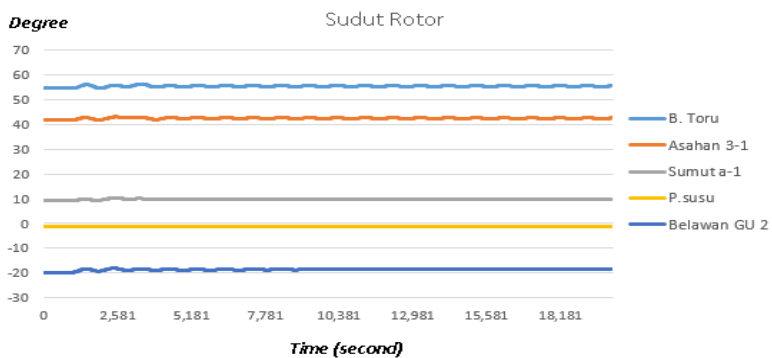


Gambar 4.18 Respon tegangan pada bus ketika saluran 89 lepas (2018 – light load)

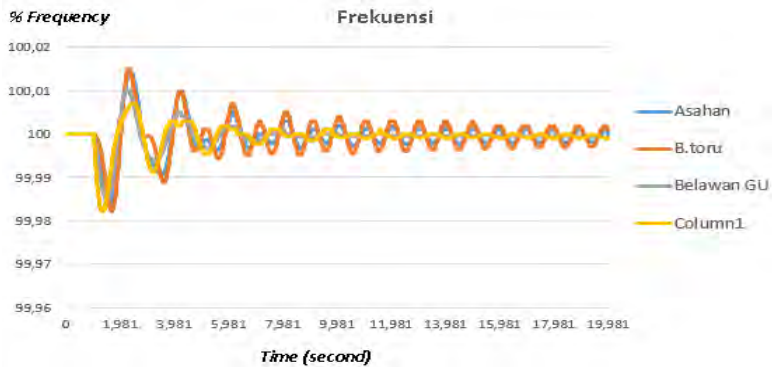
c) Tahun 2020 (beban puncak)

Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2020 untuk kasus beban puncak berada di saluran 29 yaitu antara bus **Sei Rotan – bus Titi Kuning** sebesar 306,9 MW. Pada simulasi transien ini satu saluran dari saluran ganda lepas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon

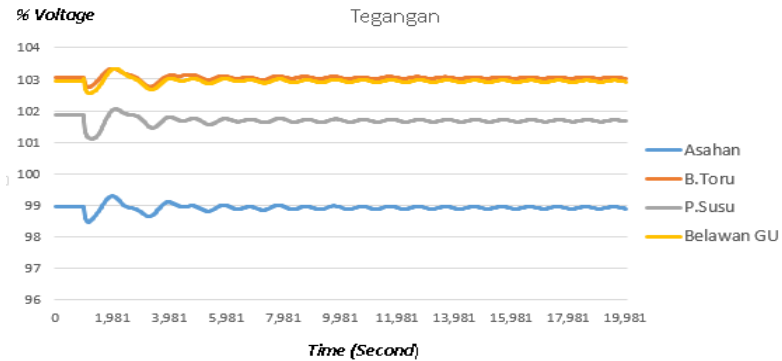
sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.19 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 29 lepas (2020 – peak load)



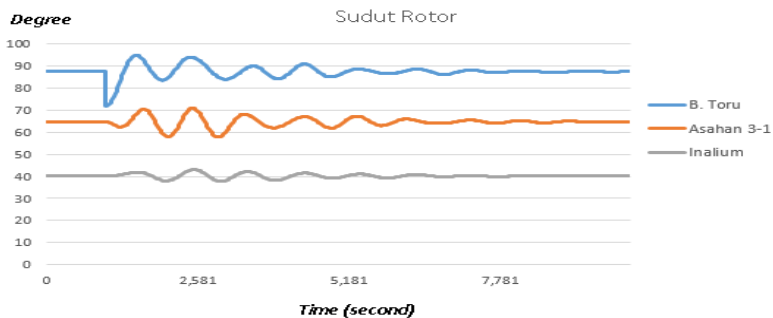
Gambar 4.20 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 29 lepas (2020 – peak load)



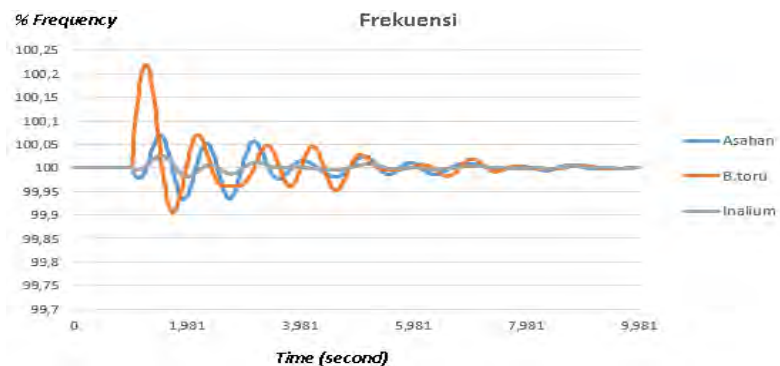
Gambar 4.21 Respon tegangan pada bus ketika saluran 29 lepas (2020 – peak load)

d) Tahun 2020 (beban dasar)

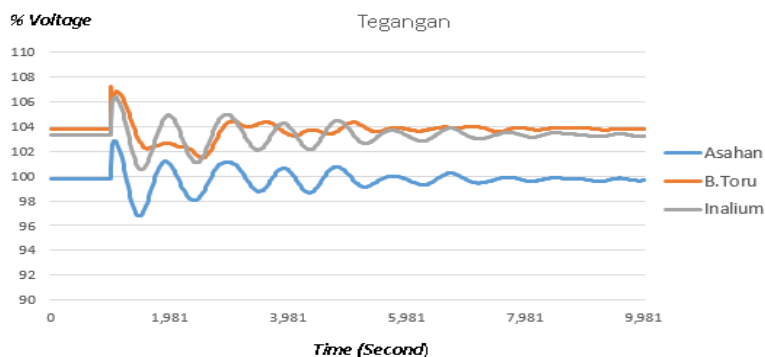
Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2020 untuk kasus beban dasar berada di saluran 199-1 yaitu antara bus **Batang Toru** – bus **Sarulla** sebesar 477,65 MW. Pada simulasi transien ini satu saluran dari saluran ganda lepas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.22 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 199-1 lepas (2020 – light load)



Gambar 4.23 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 199-1 lepas (2020 – light load)



Gambar 4.24 Respon tegangan pada bus ketika saluran 199-1 lepas (2020 – light load)

Dari hasil simulasi lepasnya saluran tunggal dari saluran ganda pada setiap sistem tahun 2018 dan 2020 beban puncak dan beban dasar masih berada pada batas stabil. Pada tahun 2018 *peak load* saluran 23 mengalami *trip* tanpa gangguan. Respon sudut rotor dan frekuensi berada pada batas stabil. Pada respon tegangan, bus PLTGU Belawan mengalami osilasi hingga mencapai 105,2% (gambar 4.15). Namun setelah itu berada pada kondisi steady state 104, 3%. Sehingga masih dalam batas stabil..

Padasistem 2020 beban dasar, respon sudut rotor pada PLTA Batan Toru mengalami osilasi hingga 94,3 *degree* (gambar 4.22). Hal ini

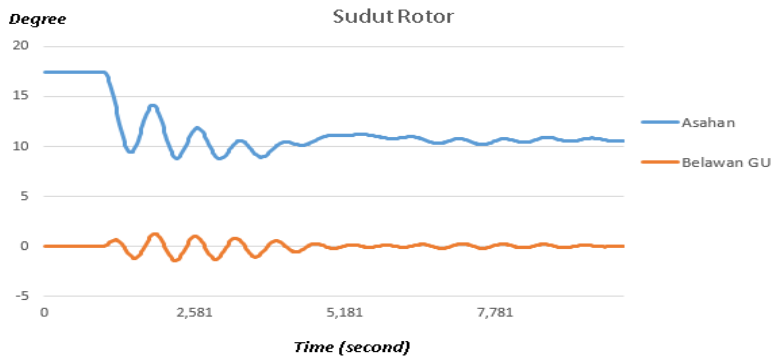
dikarenakan saluran tunggal yang lepas dari saluran ganda 199-1 menghubungkan bus Batang Toru ke Sarulla. Sehingga terjadi pergeseran sudut rotor yang besar pada PLTA Batang Toru. Pada sistem 2020 beban puncak sudut rotor pada PLTA Batang Toru 1 mengalami osilasi yang tidak terlalu besar, namun sudah mengalami pergeseran sudut rotor pada sudut 54 degree (gambar 4.19). Dan steady state pada nilai tersebut. Hal ini dikarenakan pembebanan yang besar pada PLTA Batang Toru. Sehingga sudut rotor di mulai dari sudut yang besar. Respon frekuensi pada kasus *No-Fault One-Circuit Tripping of the Double-Circuit Interconnection Transmission Line* tidak mengalami osilasi yang besar dan selalu pada kondisi batas stabil hingga *steady state* tetap stabil. Begitu juga dengan respon tegangan. Ketika saluran tunggal lepas terjadi osilasi namun langsung kembali ke kondisi *steady state* dalam batas range stabil.

4.2.3 *No-Fault Double-Circuit Tripping of Interconnection Transmission Line (saluran ganda lepas)*

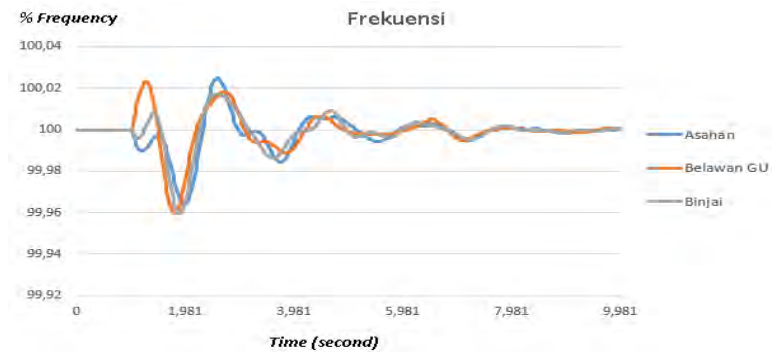
a) Tahun 2018 (beban puncak)

Pada kasus ini hampir sama dengan kasus satu saluran lepas yaitu penentuan saluran yang lepas dilihat dari aliran daya terbesar pada saluran Transmisi. Namun pada kasus ini, saluran ganda akan lepas sekaligus.

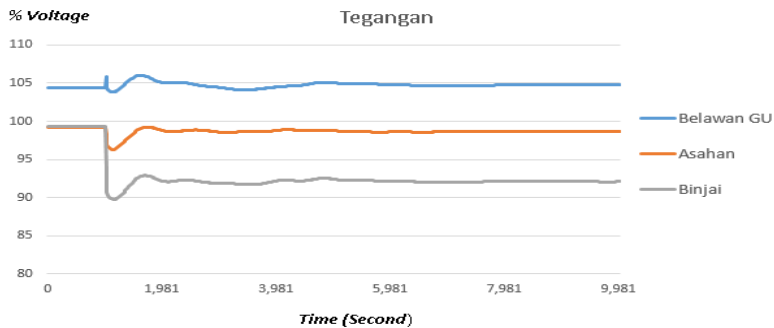
Nilai aliran daya terbesar berada di saluran 23 yaitu antara bus **PLTGU Belawan** ke bus **Binjai** yaitu 400,612 MW. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.25 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 23 lepas (2018 – peak load)



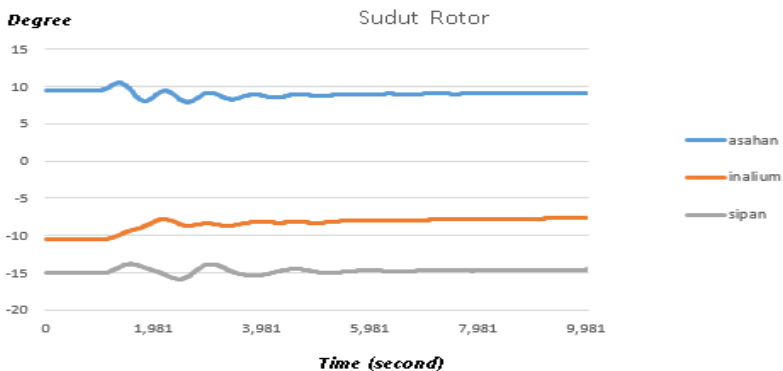
Gambar 4.26 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 23 lepas (2018 – peak load)



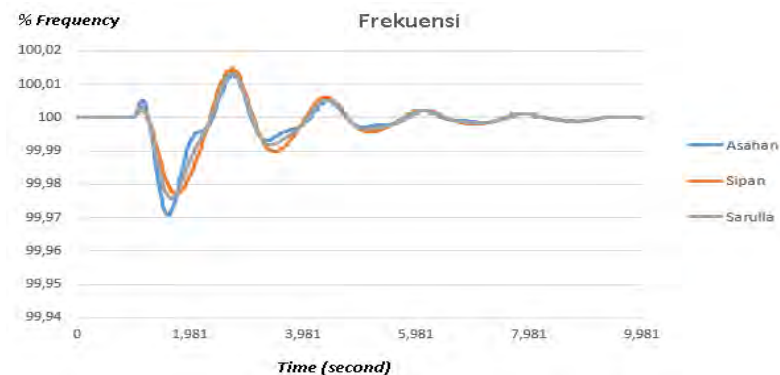
Gambar 4.27 Respon tegangan pada bus ketika saluran 23 lepas (2018 – peak load)

b) Tahun 2018 (beban dasar)

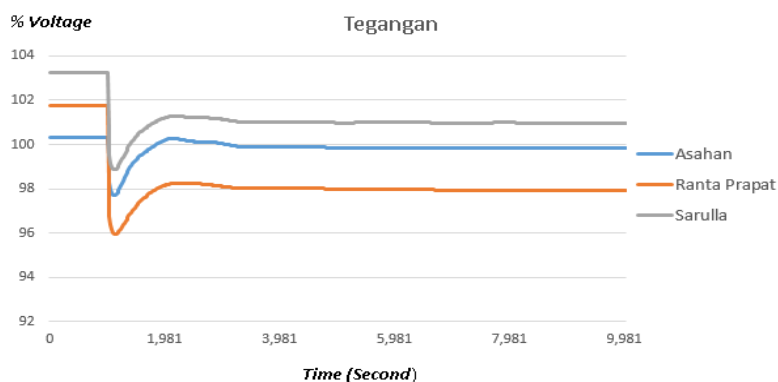
Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2020 untuk beban dasar berada di saluran 121 yaitu antara bus **Rantau Prapat – Sarulla** sebesar 473,05 MW. Pada simulasi transien ini saluran ganda lepas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.28 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 121 lepas (2018 – light load)



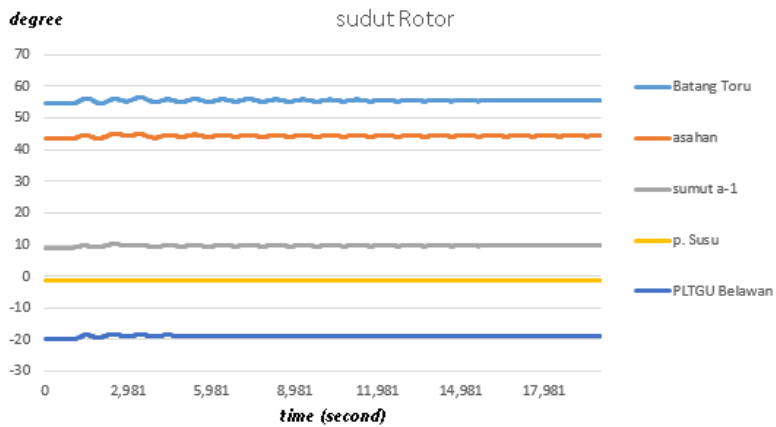
Gambar 4.29 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 121 lepas (2018 – light load)



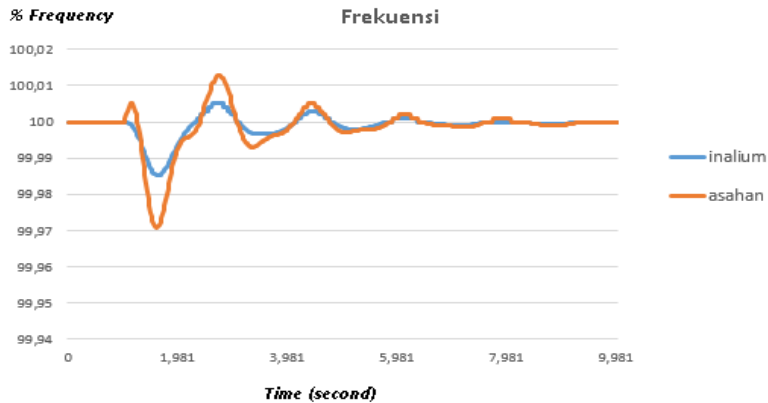
Gambar 4.30 Respon tegangan pada bus ketika saluran 121 lepas (2018 – light load)

c) Tahun 2020 (beban puncak)

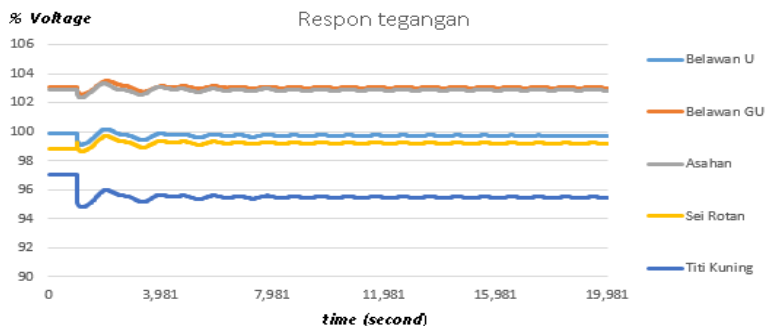
Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2020 untuk kasus beban dasar berada di saluran 29 yaitu antara bus **Sei Rotan – bus Titi Kuning** sebesar 306,9 MW. Pada simulasi transien ini saluran ganda lepas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.31 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 29 lepas (2020 – peak load)



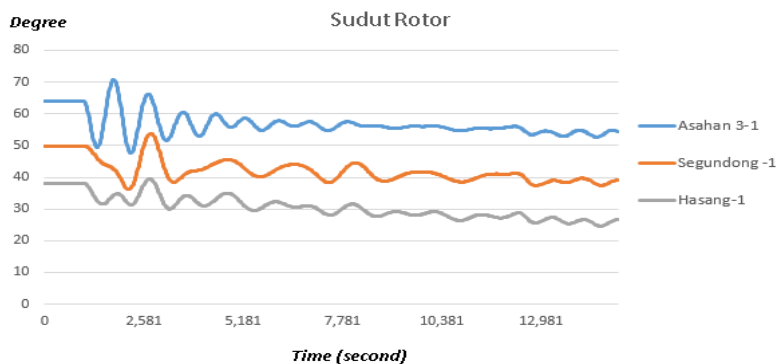
Gambar 4.32 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 29 lepas (2020 – light load)



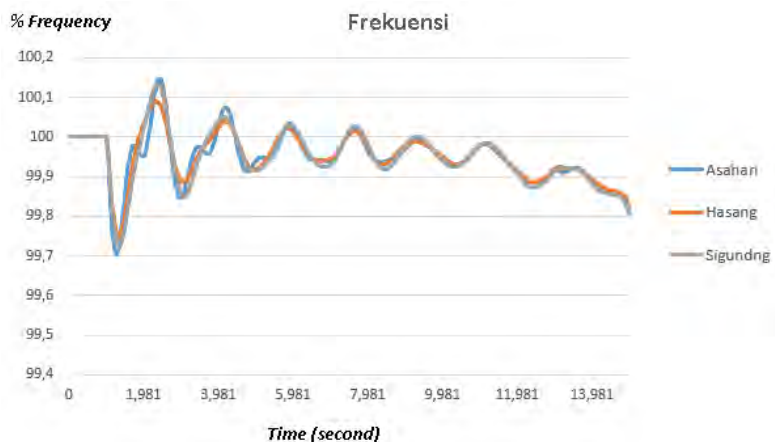
Gambar 4.33 Respon tegangan pada bus ketika saluran 29 lepas (2020 – peak load)

d) Tahun 2020 (beban dasar)

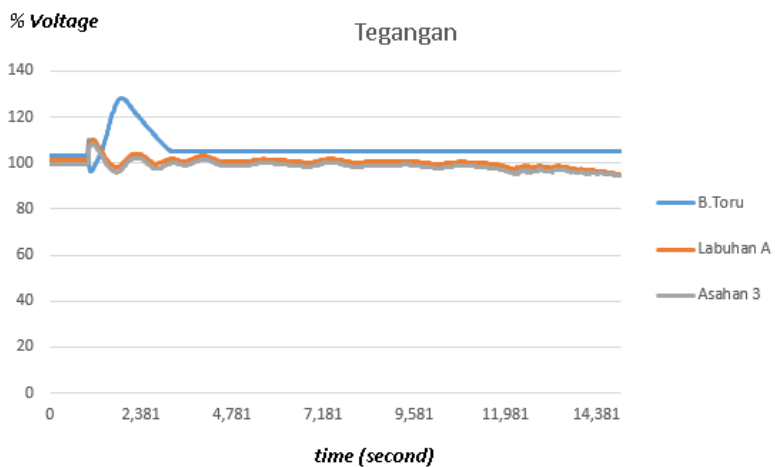
Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran transmisi Sumatera Utara 2020 untuk kasus beban dasar berada di saluran 199-1 tegangan 275 kV yaitu antara bus **Batang Toru – bus Sarulla** sebesar 477,65 MW. Pada simulasi transien ini saluran ganda lepas tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.34 Respon sudut Rotor Generator ketika saluran 199-1 lepas (2020 – light load)



Gambar 4.35 Respon frekuensi pada bus ketika saluran 199-1 lepas (2020 – light load)



Gambar 4.36 Respon tegangan pada bus ketika saluran 199-1 lepas (2020 – light load)

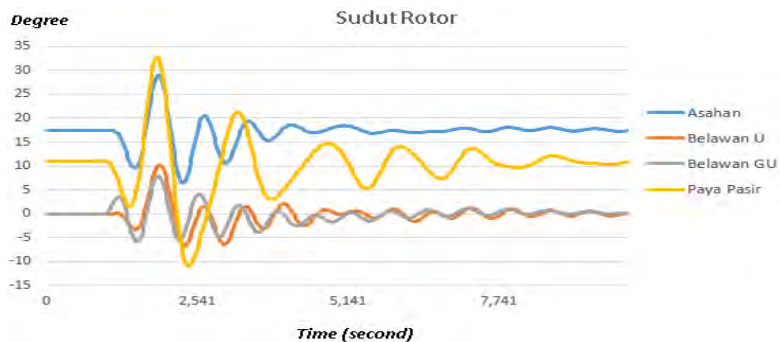
Dari hasil simulasi lepasnya saluran ganda seklaigus pada setiap sistem tahun 2018 dan 2020 beban puncak dan beban dasar masih berada pada batas stabil. Pada tahun 2018 *peak load* saluran 23 mengalami *trip* tanpa gangguan. Respon sudut rotor dan frekuensi berada pada batas stabil. Pada respon tegangan, bus PLTGU Belawan mengalami osilasi hinga mencapai 105,2% (gambar 4.15). Namun setelah itu berada pada kondisi steady state 104, 7%. Sehingga masih dalam batas stabil..

Pada sistem 2020 beban dasar, respon tegangan pada PLTA Batang Toru mengalami kenaikan osilasi hingga 128% (gambar 4.36). Hal ini dikarenakan saluran tunggal yang lepas dari saluran ganda 199-1 menghubungkan bus Batang Toru ke Sarulla. Sehingga terjadi perubahan respon tegangan yang besar pada PLTA Batng Toru. Setelah itu respon tegangan pada PLTA Batang Toru mampu kembali masuk dalam batas stabil.

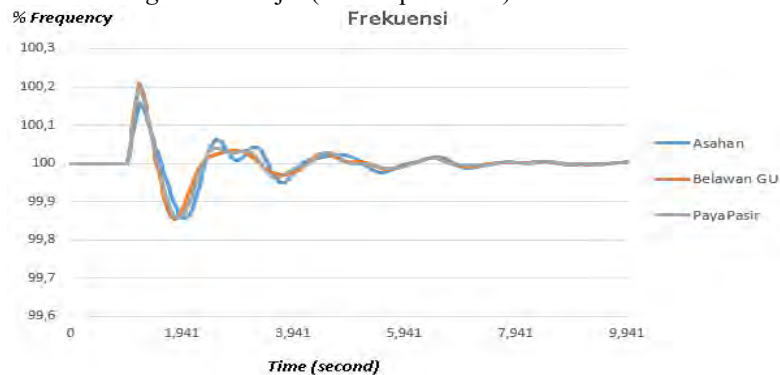
4.2.4 Single Pole Auto Reclosing

a) Tahun 2018 (beban puncak)

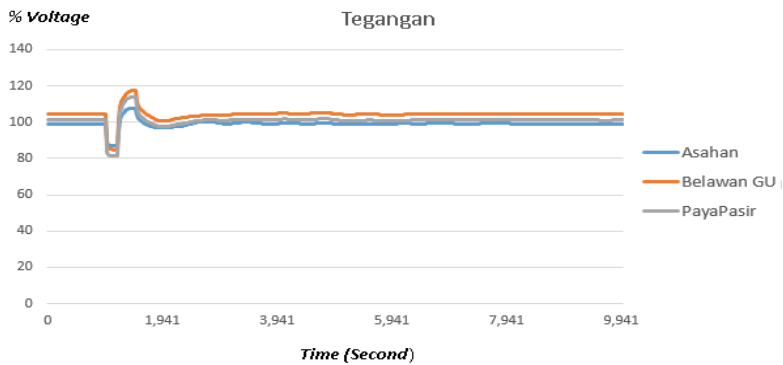
Pada kasus ini, gangguan yang disimulasikan adalah gangguan satu fasa ke tanah pada bus, kemudian diikuti lepasnya satu saluran (saluran tunggal) dari saluran ganda. Lokasi gangguan berada pada bus Binjai. Kemudian saluran 23 yang menghubungkan bus Binjai ke bus PLTGU Belawan mengalami *trip* saluran tunggal pada detik 200 ms setelah gangguan. 300 ms kemudian saluran tunggal akan terhubung kembali. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.37 Respon sudut Rotor Generator ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Binjai (2018 – peak load)



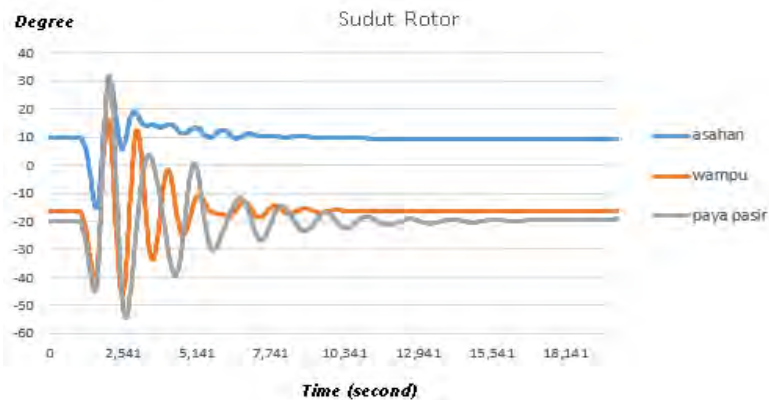
Gambar 4.38 Respon frekuensi ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Binjai (2018 – peak load)



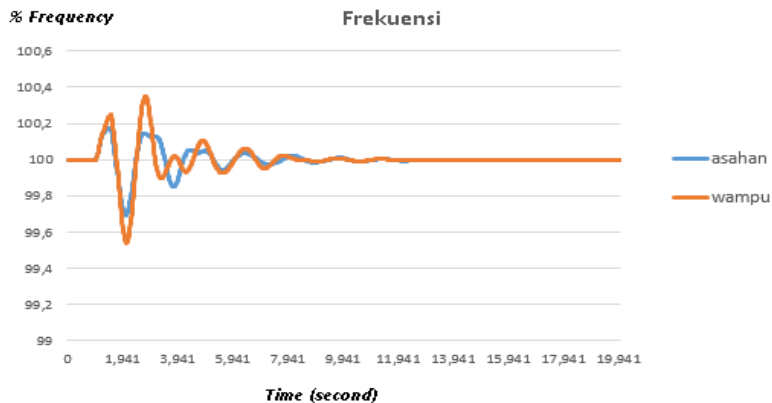
Gambar 4.39 Respon tegangan ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Binjai (2018 – peak load)

b) Tahun 2018 (beban dasar)

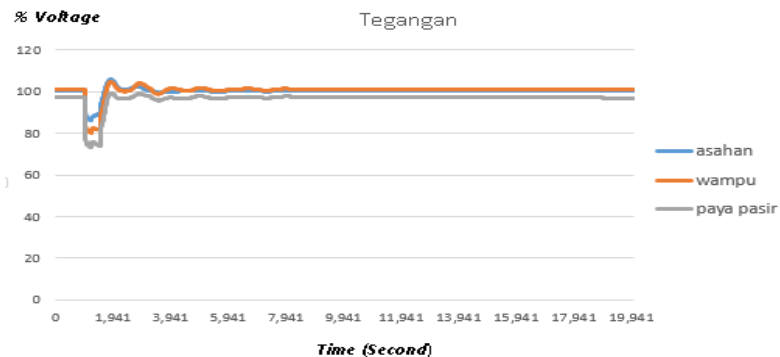
Pada tahun 2018 beban dasar, lokasi gangguan berada pada bus P. Brandan. Kemudian saluran 89 yang menghubungkan bus P. Brandan ke bus Pangkalan Susu mengalami *trip* saluran tunggal pada detik 200 ms setelah gangguan. 300 ms kemudian saluran tunggal akan terhubung kembali. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.40 Respon sudut Rotor Generator ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus P.brandan (2018 – light load)



Gambar 4.41 Respon frekuensi pada bus ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus P.brandan (2018 – light load)

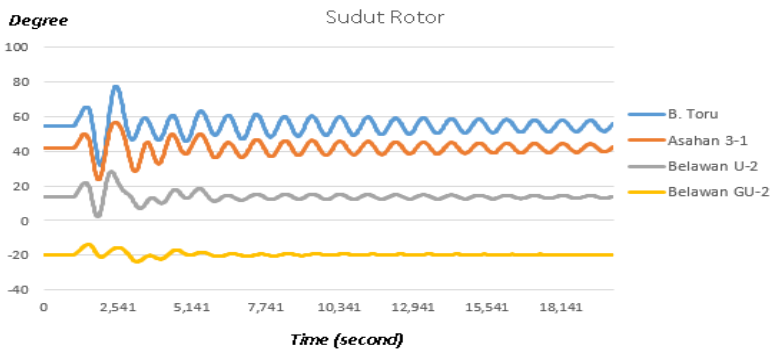


Gambar 4.42 Respon tegangan pada bus ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus P.brandan (2018 – light load)

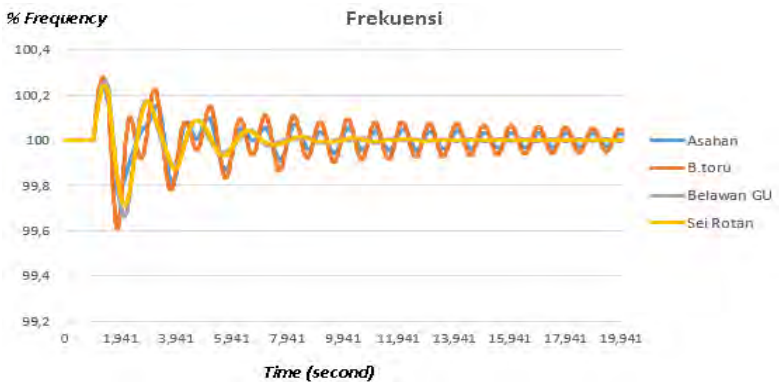
c) Tahun 2020 (beban puncak)

Pada tahun 2020 beban puncak, lokasi gangguan berada pada bus Titi Kuning. Kemudian saluran 29 yang menghubungkan bus Titi Kuning ke Sei Rotan mengalami *trip* saluran tunggal pada detik 200 ms setelah gangguan. 300 ms kemudian saluran tunggal akan terhubung kembali. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon

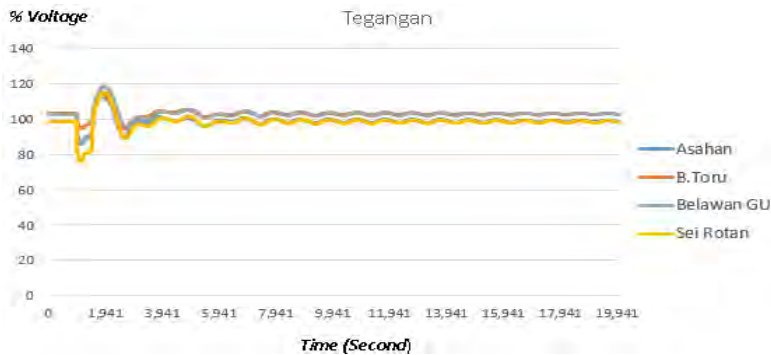
sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.43 Respon sudut Rotor Generator ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Titi Kuning (2020 – peak load)



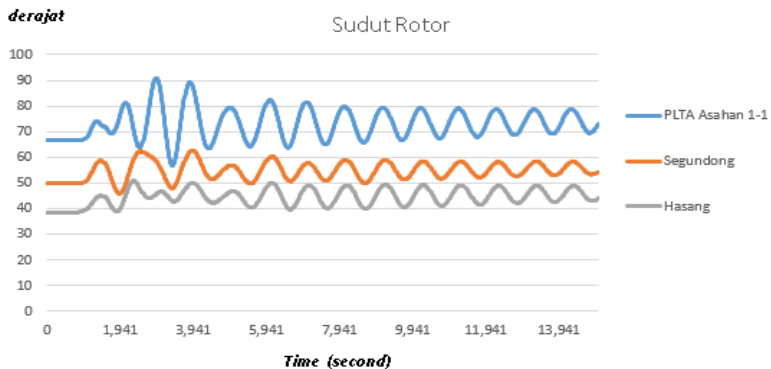
Gambar 4.44 Respon frekuensi pada bus ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Titi Kuning (2020 – peak load)



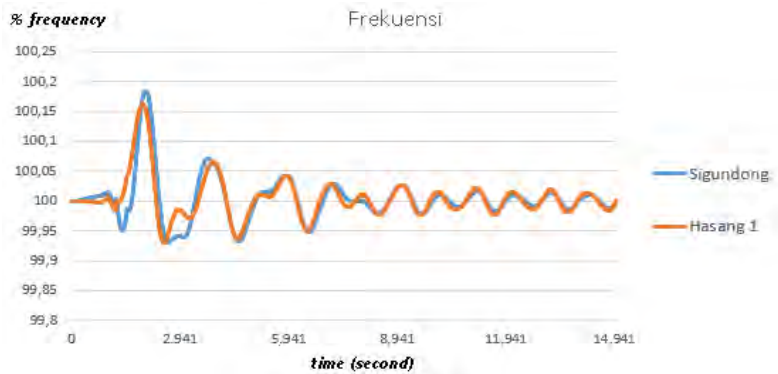
Gambar 4.45 Respon tegangan pada bus ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Titi Kuning (2020 – peak load)

d) Tahun 2020 (beban dasar)

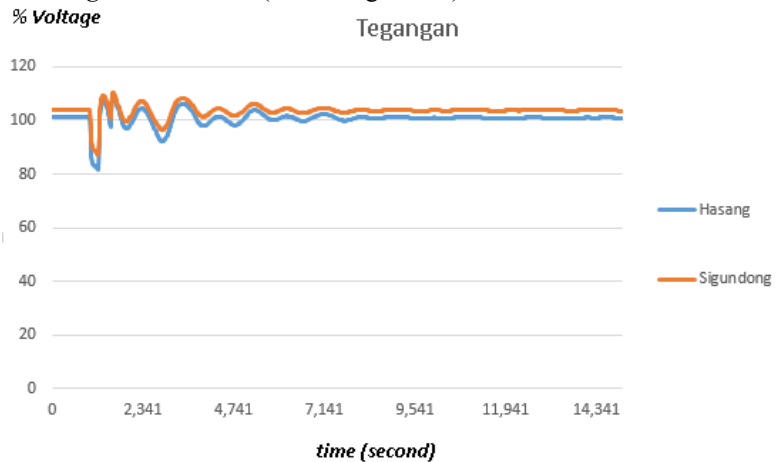
Pada tahun 2020 beban dasar, lokasi gangguan berada pada bus Sarulla. Kemudian saluran 199-1 yang menghubungkan bus Sarulla ke Batang Toru mengalami *trip* saluran tunggal pada detik 200 ms setelah gangguan. 300 ms kemudian saluran tunggal akan terhubung kembali. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.:



Gambar 4.46 Respon sudut Rotor Generator ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Sarulla (2020 – light load)



Gambar 4.47 Respon frekuensi pada bus kasus *single pole auto reclosing* di bus Sarulla (2020 – light load)



Gambar 4.48 Respon tegangan pada bus ketika kasus *single pole auto reclosing* di bus Sarulla (2020 – light load)

Pada hasil simulasi single pole auto reclosing, semua respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan masih dalam kondisi stabil. Respon sudut rotor pada PLTA Batang Toru mengalami osilasi yang besar sampai 78 *degree* (gambar 4.43). Begitu juga PLTA Asahan yang mengalami osilasi sampai 90 *degree* namun bisa kembali lagi hingga steady state pada 70 – 80 *degree* (gambar 4.46). Sehingga sistem 2018

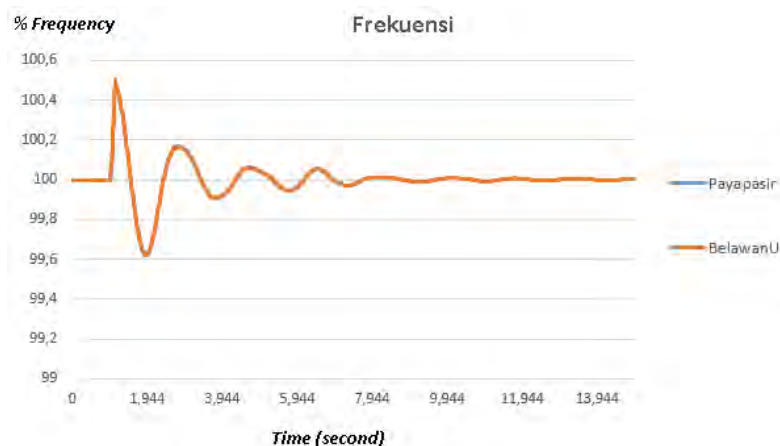
an 2020 masih dalam batas stabil saat terjadi gangguan 1 fasa dengan diikuti lepasnya saluran tunggal pada saluran ganda yang menghubungkan 2 bus hingga saluran tunggal terhubung kembali.

4.2.1 Critical Clearing Time (CCT) / Waktu Pemutusan Kritis

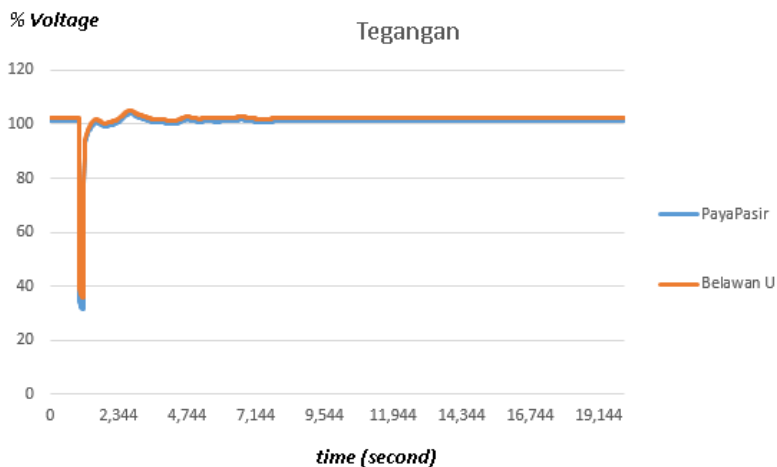
Pada kasus ini, gangguan yang disimulasikan adalah gangguan hubung singkat 3 fasa. Gangguan hubung singkat 3 fasa ini dipilih secara acak, kemudian diikuti dengan lepasnya saluran tunggal (*one circuit*) dari saluran ganda. Waktu membukanya CB pada saluran tunggal saat sistem masih stabil hingga sistem tidak stabil disebut *critical clearing time*. Hasil Simulasi akan ditunjukkan respon sudut rotor, dan frekuensi.

a) Tahun 2018 (beban puncak)

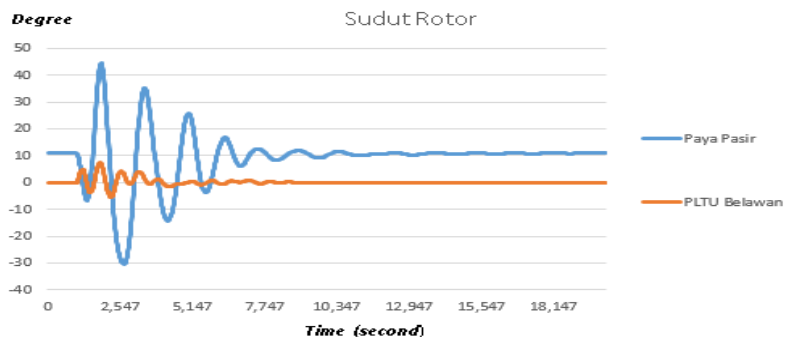
Pada tahun 2018 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran 166 (saluran antara bus Paya Geli dan Batu Gingging). Kemudian *one circuit* dari saluran ganda 166 lepas. Dengan metode *trial and error* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ($t = 0,126-0,127$ detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.49 sampai 4.54 sebagai berikut :



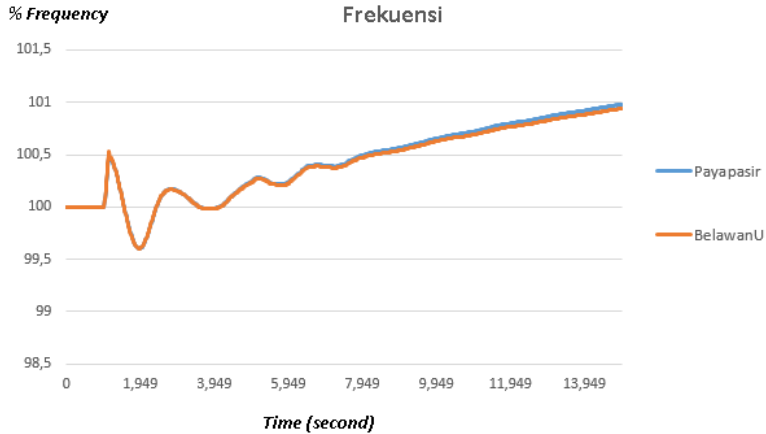
Gambar 4.49 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara bus Paya Geli dan Batu Gingging saat kondisi stabil pada detik ke 0,126 setelah gangguan (2018 – peak load)



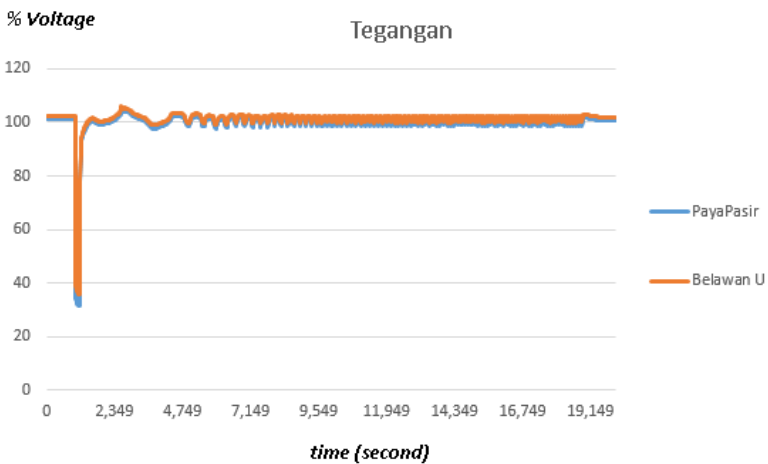
Gambar 4.50 Respon tegangan di bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara bus Paya Geli dan Batu Gingging saat kondisi stabil pada detik ke 0,126 setelah gangguan (2018 – peak load)



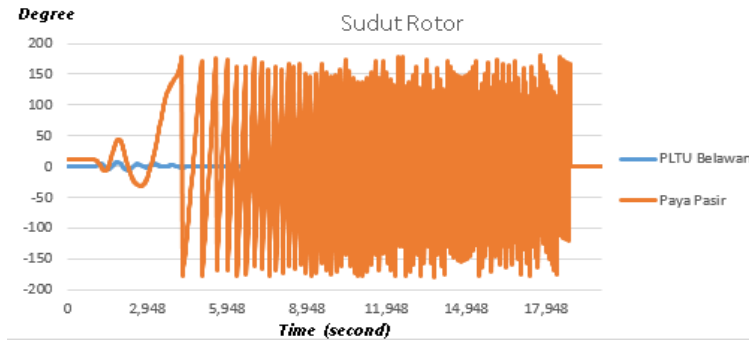
Gambar 4.51 Respon sudut rotor di generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara bus Paya Geli dan Batu Gingging saat kondisi stabil pada detik ke 0,126 setelah gangguan (2018 – peak load)



Gambar 4.52 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara bus Paya Geli dan Batu Gingging saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,127 setelah gangguan (2018 – *peak load*)



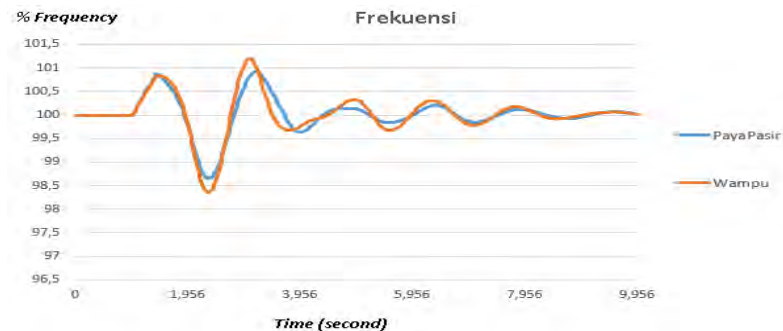
Gambar 4.53 Respon tegangan di bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara bus Paya Geli dan Batu Gingging saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,127 setelah gangguan (2018 – *peak load*)



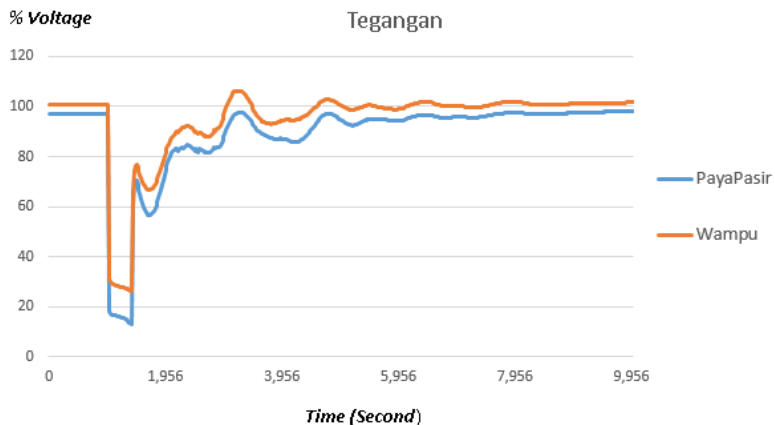
Gambar 4.54 Respon sudut rotor di generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara bus Paya Geli dan Batu Gingging saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,127 setelah gangguan (2018 – peak load)

b) Tahun 2018 (beban dasar)

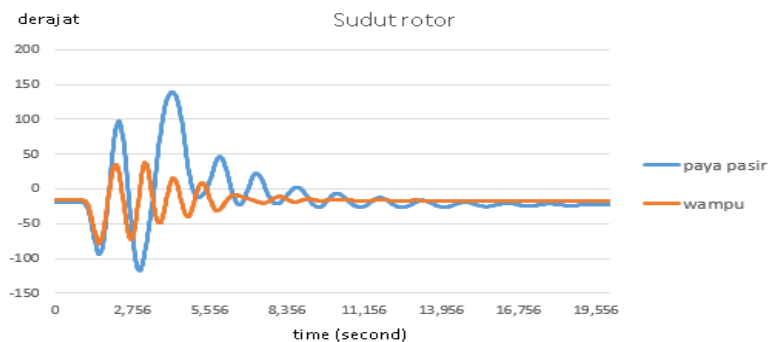
Pada tahun 2018 beban dasar, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran 166 (saluran antara bus Paya Geli dan Batu Gingging). Kemudian *one circuit* dari saluran ganda 166 lepas. Dengan metode *trial and error* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ($t = 0,396-0,397$ detik).



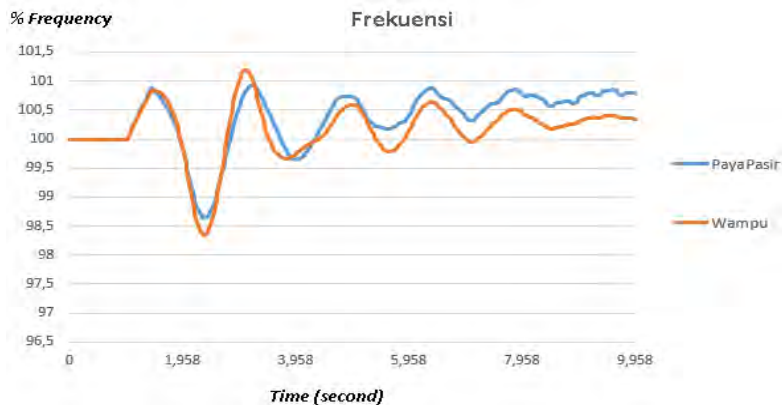
Gambar 4.55 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik 0,396 setelah gangguan (2018 – *light load*)



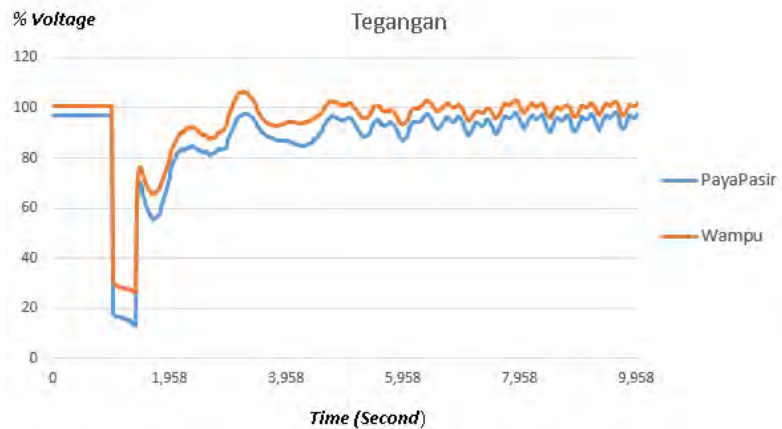
Gambar 4.56 Respon tegangan pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik 0,396 setelah gangguan (2018 – *light load*)



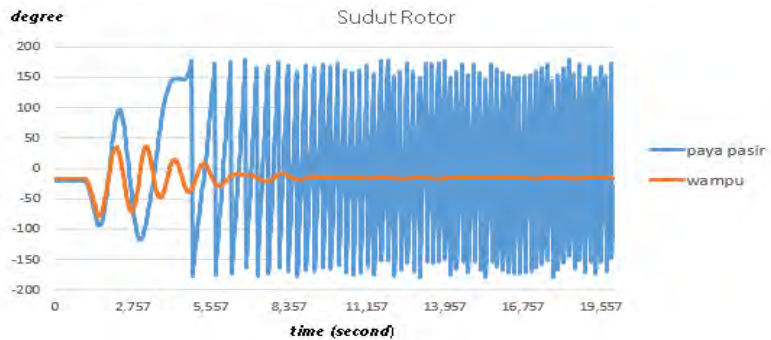
Gambar 4.57 Respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik 0,396 setelah gangguan (2018 – *light load*)



Gambar 4.58 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik 0,397 setelah gangguan (2018 – *light load*)



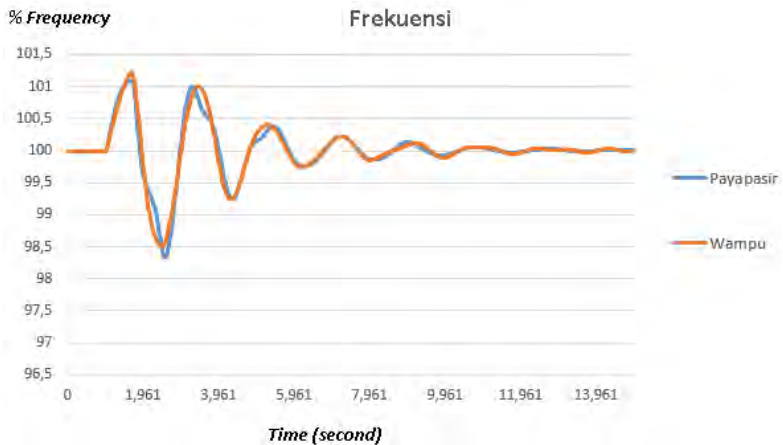
Gambar 4.59 Respon tegangan pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik 0,397 setelah gangguan (2018 – *light load*)



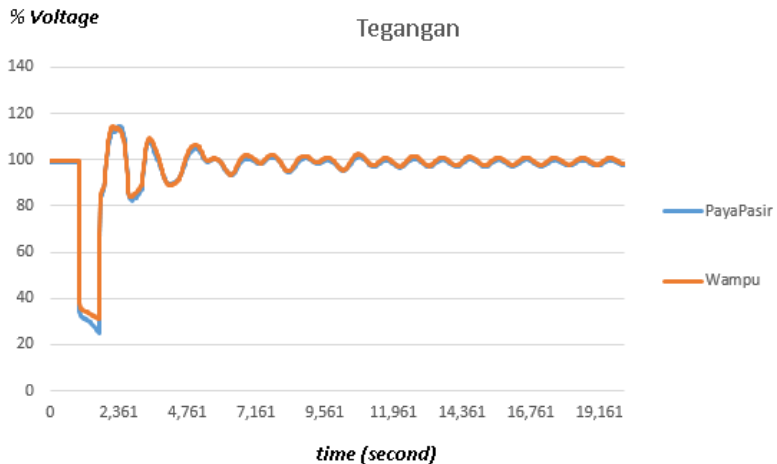
Gambar 4.60 Respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik 0,397 setelah gangguan (2018 – *light load*)

c) Tahun 2020 (beban puncak)

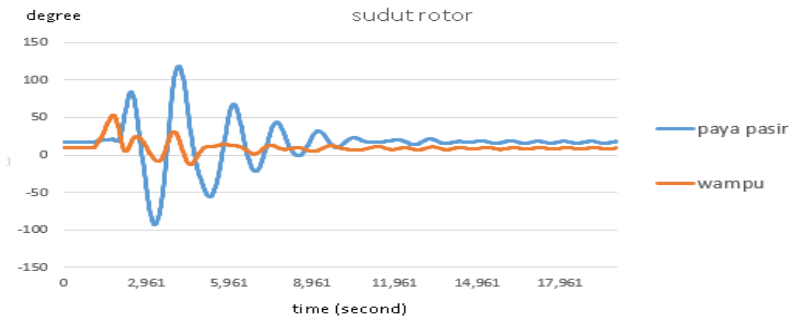
Pada tahun 2020 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran 166 (saluran antara bus Paya Geli dan Batu Gingging). Kemudian *one circuit* dari saluran ganda 166 lepas. Dengan metode *trial and error* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ($t = 0,799-0,800$ detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.49 sampai 4.54 sebagai berikut:



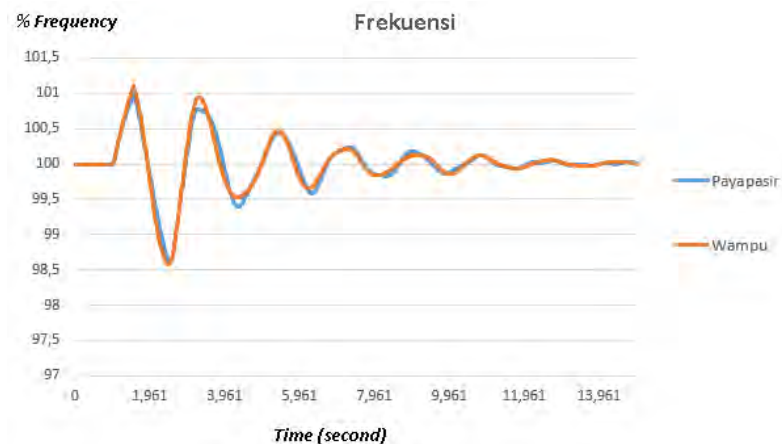
Gambar 4.61 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik ke 0,799 setelah gangguan (2020 – *peak load*)



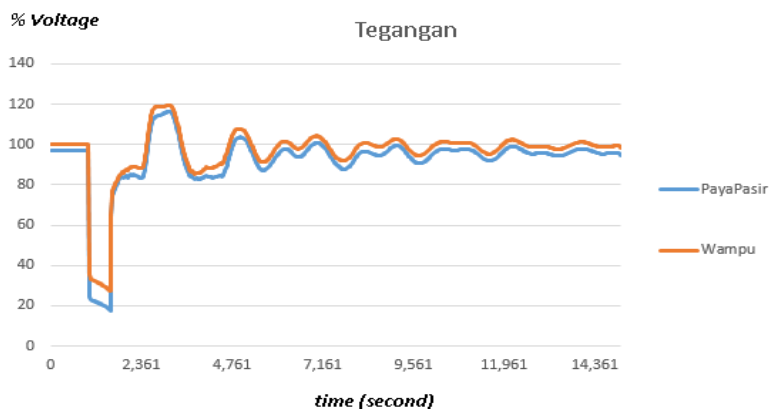
Gambar 4.62 Respon tegangan pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik ke 0,799 setelah gangguan (2020 – *peak load*)



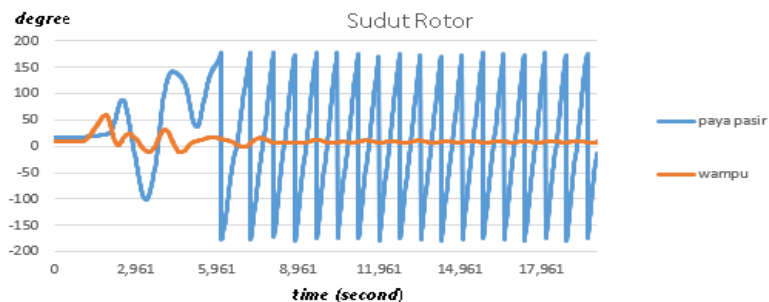
Gambar 4.63 Respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik ke 0,799 setelah gangguan (2020 – *peak load*)



Gambar 4.64 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,800 setelah gangguan (2020 – *peak load*)



Gambar 4.65 Respon tegangan pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,800 setelah gangguan (2020 – *peak load*)

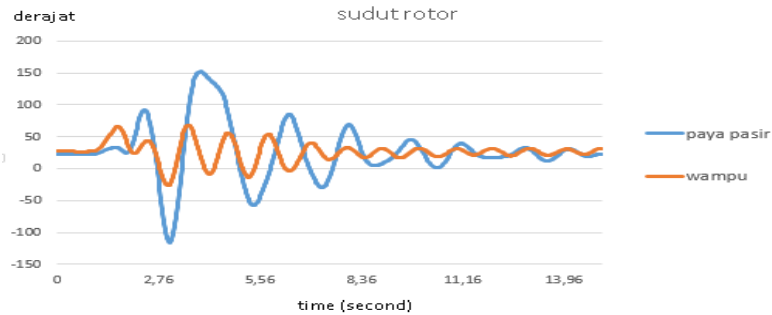


Gambar 4.66 Respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,800 setelah gangguan (2020 – *peak load*)

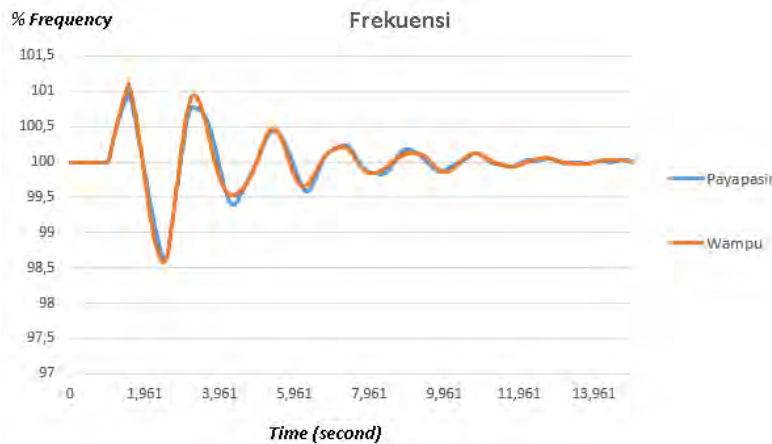
d) Tahun 2020 (beban dasar)

Pada tahun 2020 beban dasar, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran 166 (saluran antara bus Paya Geli dan Batu Gingging). Kemudian *one circuit* dari saluran ganda 166 lepas. Dengan metode

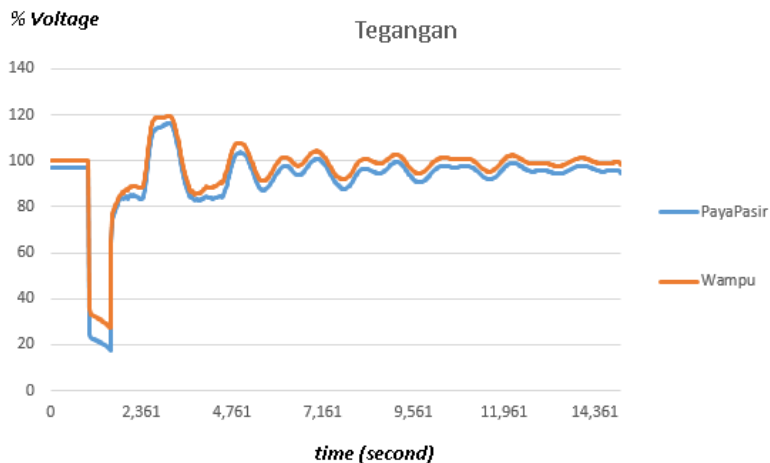
trial and error didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ($t = 0,593\text{--}0,594$ detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.49 sampai 4.54 sebagai berikut:



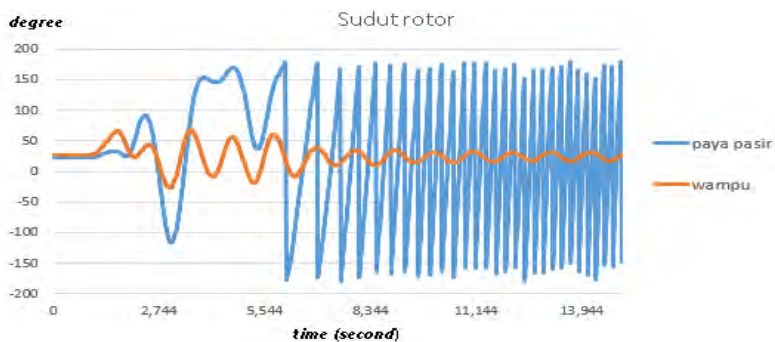
Gambar 4.67 Respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik ke 0,593 setelah gangguan (2020 – *light load*)



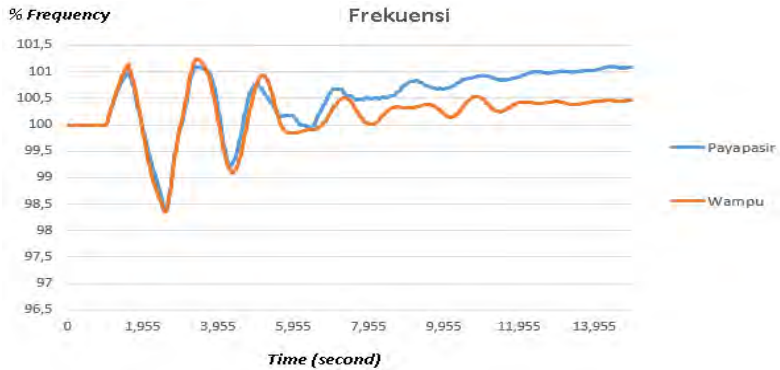
Gambar 4.68 Respon frekuensi pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik ke 0,593 setelah gangguan (2020 – *light load*)



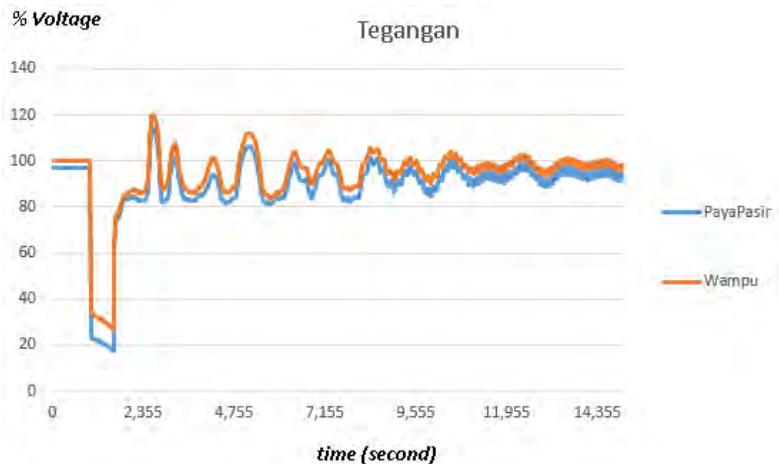
Gambar 4.69 Respon tegangan pada bus ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi stabil pada detik ke 0,593 setelah gangguan (2020 – *light load*)



Gambar 4.70 Respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,694 setelah gangguan (2020 – *light load*)



Gambar 4.71 Respon frekuensi pada bus ketika ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,594 setelah gangguan (2020 – *light load*)



Gambar 4.72 Respon tegangan pada bus ketika ketika terjadi gangguan 3 fasa di saluran 166 yaitu antara Batu Gingging dan Paya Geli saat kondisi tidak stabil pada detik ke 0,594 setelah gangguan (2020 – *light load*)

Berdasarkan gambar hasil simulasi di atas, dari tahun 2018 peak hingga 2020 light perubahan kondisi stabil dan tidak stabil pada sistem selisih 0,001 detik. Yang artinya hanya berjarak 0,001 detik kondisi yang awalnya tidak stabil erubah menjadi stabil. Terlihat jelas pada perubahan sudut rotor generator Paya Pasir. Saat kondis tidak stabil, sudut rotor mengalami osilasi hingga 170 – 180 *degree*. Setelah pada kondisi stabil, osilasi tertinggi sudut rotor Generator Paya Pasir 68 *degree*. Dan stabil pada 10 – 30 *degree* (gambar 4.67).

Nilai *CCT (Critical Clearing Time)* yang didapat melalui *trial and error* pada kasus di atas adalah sebagai berikut :

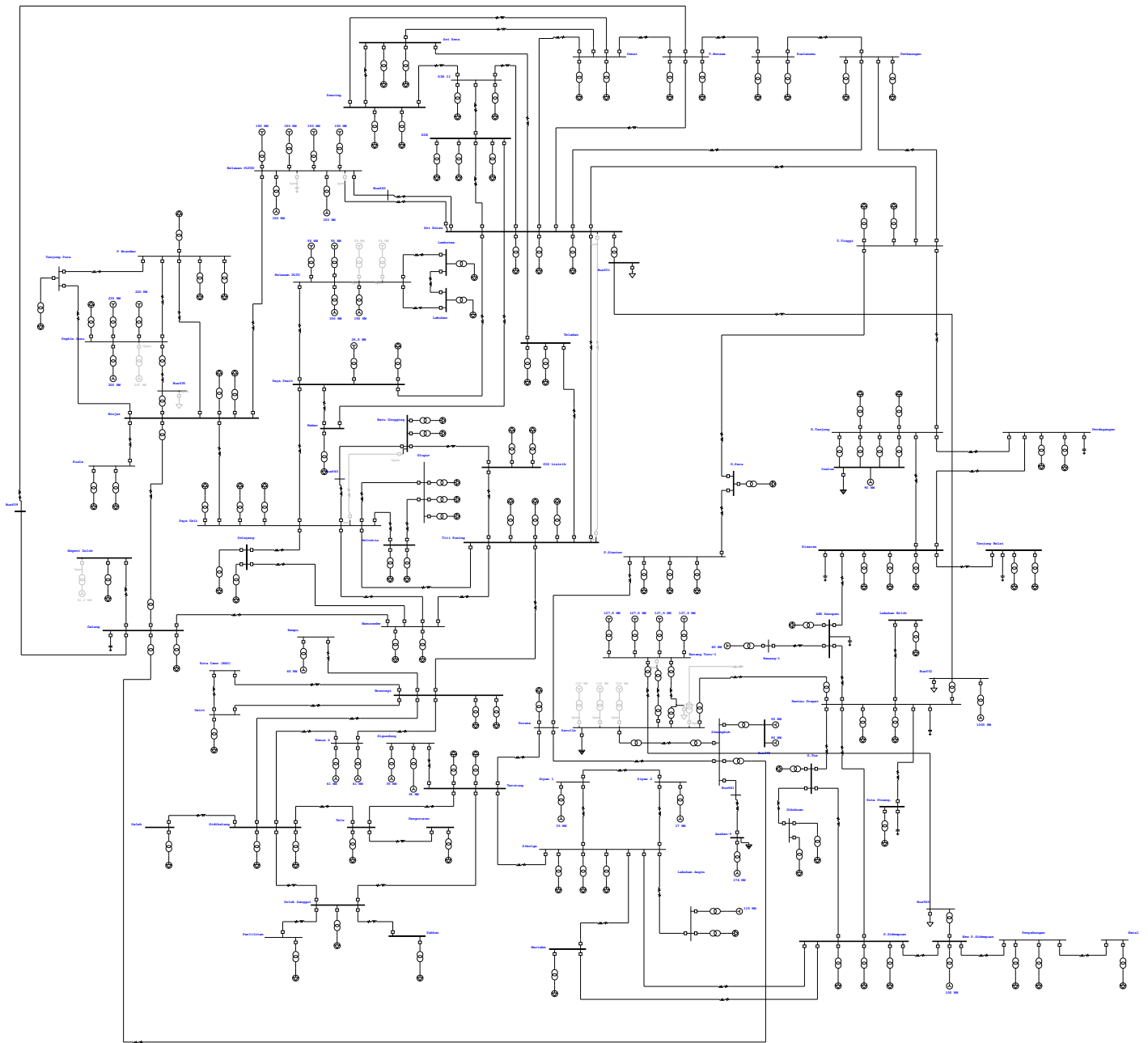
Tabel 4.2 Nilai CCT pada bus saluran Paya Geli – Batu Gingging

Tahun sistem	Waktu stabil (mili detik)	Waktu tidak stabil (mili detik)
2018 (peak)	126	127
2018 (light)	396	397
2020 (peak)	799	800
2020 (light)	593	594

Pada sistem tahun 2018 beban puncak, nilai CCT berada dalam *range* rekomendasi waktu pemutusan kritis untuk sistem transmisi yaitu 120 ms – 140 ms. Sedangkan pada sisem tahun 2018 beban dasar dan tahun 2020 waktu pemutusan kritsnya melebihi dari *range* rekomendasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

One-Line Diagram - OLV1 (Edit Mode)



Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisis, maka dalam Tugas Akhir ini dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- Dari kasus Generator lepas dan saluran lepas, sistem masih dalam batas stabil. Karena saat salah satu generator lepas, sistem Sumatera Utara hanya kehilangan 5-8% daya supply pada sistem. Pada saat PLTA Batang Toru masuk, Generator Batang Toru mengalami kenaikan sudut rotor yang hampir mencapai batas kestabilan yaitu 80,3 *degree*.
- Dari kasus *Single Pole Auto Reclosing*, sistem juga masih dalam kondisi stabil dengan waktu *line reclosed* 500 ms setelah gangguan.
- Pada sistem 2018 beban puncak maupun beban dasar, nilai Critical Clearing Time yang didapat adalah 126 ms - 127 ms untuk beban puncak, dan 396 ms - 397 ms untuk beban dasar. Sedangkan untuk sistem 2020 adalah 799 ms – 800 ms untuk beban puncak, dan 593 ms – 594 ms. Namun batas membukanya CB dengan cepat untuk sistem transmisi 150 kV adalah 120 ms – 140 ms. Sehingga untuk sistem 2018 beban dasar dan sistem tahun 2020 tidak direkomendasikan untuk menggunakan waktu CCT sesuai hasil simulasi. Karena melebihi waktu 140 ms

5.2 SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan setelah melakukan analisa adalah sebagai berikut :

- Untuk mendapatkan hasil kestabilan transien yang lebih akurat, harus melakukan lebih banyak case dengan lokasi yang berbeda beda. Karena pada tugas akhir ini hanya beberapa contoh jenis kasus yang mungkin terjadi untuk efek transien di sistem transmisi
- Untuk mendapatkan nilai CCT di ETAP harus dilakukan dengan teliti dengan cara trial and error, karena selisih antar batas stabil dan tidak stabil hanya 0,001 ms.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

1. Imam Robandi, Margo Pujiantara, "*Analisa Sistem Tenaga Modern [Pengantar stabilitas Dinamik]*" Proyek Percepatan Pendidikan Insinyur th 1996/1997 FTI ITS, 1997.
2. Kundur, P., "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill, Inc, 1994.
3. Stevenson, W.D., Jr and John J. Grenger, "*Elements of Power System Analysis, 4th Edition*". McGraw-Hill, Inc, 1994
4. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "*Definition and Classification of Power System Stability*" IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
5. Saadat, H., "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, Inc, 1999.
6. Marsudi, Djiteng., "*Operasi Sistem Tenaga Listrik*", Graha ilmu, Yogyakarta, 1994.
7. Penangsang, Ontoseno. "*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
8. Azizah, Nurul," *Analisis stabilitas transien pada sistem kelistrikan larantuka (NTT) akibat penambahan PLTU 2x4 M W tahun 2013*". Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2010.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Danar Tri Kumara dilahirkan di kota kediri, 11 September 1992. Penulis memulai jenjang pendidikannya di SDN Campurejo 2 hingga lulus tahun 2005. Setelah itu penulis melanjutkan studinya di SMP Negeri 1 Kediri dan lulus tahun 2008, penulis diterima sebagai murid SMA Negeri 1 Kediri hingga lulus tahun 2011. Pada tahun yang sama penulis masuk ke Jurusan D3 Elektro Industri Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) hingga lulus tahun 20014. Kemudian penulis melanjutkan studi

Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lewat program Lintas Jalur mengambil jurusan Teknik Elektro dan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi dia alamat email dtk_kumara@yahoo.co.id.